



**Titre:** Développement d'une méthode d'analyse du cycle de vie  
**Title:** prospective appliquée à la sidérurgie

**Auteur:** François Saunier  
**Author:**

**Date:** 2012

**Type:** Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

**Référence:** Saunier, F. (2012). Développement d'une méthode d'analyse du cycle de vie  
**Citation:** prospective appliquée à la sidérurgie [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/977/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**  
Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/977/>  
**PolyPublie URL:**

**Directeurs de  
recherche:** Réjean Samson  
**Advisors:**

**Programme:** Génie chimique  
**Program:**

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODE D'ANALYSE DU CYCLE DE VIE  
PROSPECTIVE APPLIQUÉE À LA SIDÉRURGIE

FRANÇOIS SAUNIER  
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE  
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION  
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES  
(GÉNIE CHIMIQUE)  
DÉCEMBRE 2012

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODE D'ANALYSE DU CYCLE DE VIE PROSPECTIVE  
APPLIQUÉE À LA SIDÉRURGIE

Présenté par : SAUNIER François

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Mme DESCHÊNES Louise, Ph. D., présidente

M. SAMSON Réjean, Ph. D., membre et directeur de recherche

Mme GAUDREAU Caroline, Ph. D., membre

## DÉDICACE

*À Alice et Maurice.*

## REMERCIEMENTS

J'aimerais tout d'abord remercier mon directeur de recherche, le Pr Réjean Samson, de m'avoir fait confiance et permis de réaliser ce beau projet. Je souhaite aussi remercier du fond du cœur Annie Levasseur pour sa disponibilité et ses conseils tout au long de cette maîtrise. Ce fut un plaisir de travailler avec toi. Merci aussi à tous les membres du CIRAIG qui, par leurs remarques et conseils, ont contribué à faire avancer ce projet.

Je tiens par ailleurs à remercier Jean-Pierre Birat de m'avoir accueilli en stage au sein du département Sustainability chez ArcelorMittal, pour ces nombreux conseils et pour les discussions très enrichissantes que nous avons eues. Ce fut une très belle occasion de découvrir une vision plus industrielle de l'analyse du cycle de vie. Je remercie également l'ensemble des équipes ELM et ULCOS pour leur accueil chaleureux et leur coopération.

Je voudrais aussi remercier tous les partenaires de la Chaire internationale en analyse du cycle de vie pour leur soutien financier.

Un gros merci à tous les membres du CIRAIG rencontrés au cours de ces deux magnifiques années. La bonne ambiance et la joie de vivre qui règnent dans les locaux ont été d'une aide précieuse ! Merci aux étudiants du CIRAIG, présents et passés, avec qui j'ai passé de très bons moments. Un remerciement spécial aux collègues du 3<sup>e</sup> étage pour la superbe ambiance qui a régné dans notre bureau. Merci pour votre soutien, que ça soit sous forme de musiques, de gâteaux, de conseils ou autres.

Merci à ma famille pour leur soutien infaillible tout au long de ces études, malgré la distance que ne rend pas toujours les choses faciles. Merci à mes amis, sur les deux continents, pour leur réconfort et pour les excellents moments passés ces dernières années.

## RÉSUMÉ

La sidérurgie est aujourd'hui l'un des plus gros émetteurs de gaz à effet de serre (GES) dans le secteur industriel. L'acier étant un matériau omniprésent dans notre société et en production croissante, des solutions doivent être trouvées pour lutter contre cette pollution et pour se préparer aux futures réglementations dans ce domaine. Ce projet de maîtrise s'intéresse à l'évaluation de la performance environnementale de plusieurs technologies de production d'acier, que ce soit les filières traditionnelles ou des filières actuellement en développement. Dans cette optique, la méthode utilisée est l'analyse du cycle de vie (ACV), qui permet d'évaluer les impacts potentiels d'un produit sur l'ensemble de son cycle de vie. Néanmoins, la plupart des technologies à l'étude sont en cours de développement et elles ne seront implantées à l'échelle industrielle que dans les années ou décennies à venir. L'influence du temps sur les résultats doit donc indispensablement être prise en considération dans cette analyse. C'est pourquoi une approche particulière de la méthodologie d'ACV est utilisée : l'analyse du cycle de vie prospective (ACV-P).

L'objectif de ce projet est de développer une approche d'analyse du cycle de vie prospective applicable à l'industrie sidérurgique. Pour ce faire, une méthodologie novatrice est proposée en intégrant une méthode permettant de pallier une lacune identifiée dans la littérature : l'influence des changements technologiques sur les données d'inventaire. L'approche proposée utilise des projections de politiques environnementales pour modifier les données d'inventaire. Cette intégration de l'effet de futures réglementations est appliquée aux données d'inventaire grâce à l'utilisation de facteurs de réduction dépendant de l'horizon de temps choisi. Pour tester la méthodologie développée, le cas d'étude du projet ULCOS (*Ultra-Low Carbon dioxide Steelmaking*), proposant des filières innovantes de production d'acier, a été choisi et ces différentes étapes lui sont appliquées.

Dans un premier temps, une analyse du cycle de vie attributionnelle a été effectuée pour identifier les parties du système concernées par un éventuel développement prospectif. Elle a aussi permis de comparer les impacts potentiels des différentes technologies en se basant sur les

données actuelles leur étant associées. Les résultats de cette analyse préliminaire montrent que les nouvelles technologies étudiées ont un plus faible impact sur le changement climatique que la filière traditionnelle par haut fourneau, utilisée comme référence. Pour les autres catégories d'impacts étudiées (à savoir l'acidification, l'eutrophisation, la création d'ozone photochimique et l'utilisation des ressources abiotiques), les conclusions sont plus mitigées. En effet, dans ces catégories, certaines filières présentent parfois des impacts supérieurs à ceux de la filière de référence. Il est donc essentiel de prendre en considération cet aspect avant leur future implémentation afin d'éviter un déplacement d'impacts.

Par la suite, les développements prospectifs de cette étude initiale sont effectués. Dans cette étude prospective, deux visions du futur sont comparées : une première « *business as usual* » et une seconde plus stricte en matière d'émissions de GES. Dans un premier temps, l'analyse porte sur l'évolution temporelle des hypothèses liées à l'électricité et au transport. L'influence de la variation temporelle du mix électrique est en particulier mise en évidence. Dans un second temps, l'impact des futures politiques environnementales sur l'inventaire est développé. Ce facteur a une influence prédominante sur les résultats. Pour synthétiser cette étude, les différents aspects prospectifs sont appliqués simultanément à l'inventaire et les filières de production d'acier sont comparées à l'horizon 2050.

Pour les deux scénarios étudiés, les impacts associés à chaque technologie diminuent avec le temps sur la période considérée (2000-2050). En 2050, selon les filières et les scénarios, les impacts potentiels diminuent par exemple entre 15% et 86% dans la catégorie changement climatique et entre 74% et 89% pour l'acidification, par rapport aux résultats initiaux ne considérant pas ces aspects prospectifs. Les résultats de l'étude sont donc influencés de manière importante par l'approche prospective. Les impacts associés à la sidérurgie européenne dans son ensemble ont aussi été modélisés à partir des résultats calculés pour chaque filière actuelle ou future de production d'acier. Ils montrent qu'une réduction d'un facteur 50% des émissions de GES associées à la production d'acier est possible grâce au développement de nouvelles technologies. Les impacts dans les autres catégories considérées devraient aussi diminuer en parallèle.

Même si ce travail a été mis en place dans le cas particulier de notre étude, la méthodologie proposée est adaptable et généralisable à d'autres analyses. Son application a

néanmoins soulevé certaines limites et, par conséquent, plusieurs recommandations ont été formulées pour améliorer la méthode, dont les principales sont les suivantes :

- Affiner les facteurs de réduction avec par exemple une régionalisation des objectifs de réduction;
- Étendre la méthodologie à toutes les substances de l'inventaire et aux données sur les entrants dans les processus;
- Paramétrer la méthode dans des bases de données pour faciliter son utilisation et améliorer sa précision.



## ABSTRACT

The steel industry is currently one of the most important industrial greenhouse gas (GHG) emitters in the world. Since the demand for steel is continuously increasing due to all potential applications in our everyday lives, we have to find solutions to tackle environmental issues and to get prepared for forthcoming regulations in this field. This master thesis focuses on the assessment of the environmental performance of different existing and developing steel production technologies. In order to reach this purpose, the life cycle assessment (LCA) methodology has been chosen, which allows evaluating the potential impacts of a product through its different life cycle stages. Nevertheless, most of the studied technologies are currently in development and will only be implemented at the industrial scale in years or decades. The influence of time on the results becomes critical in this study and has therefore to be considered. This is why a special declination of the LCA methodology is used: the prospective life cycle assessment approach.

The aim of this master thesis is to develop a prospective life cycle assessment approach for the steel industry. To achieve this goal, an innovative method is developed to integrate the influence of technological changes on inventory data. The proposed approach uses projected environmental policies to predict future emissions. The integration of the effect of future regulations on inventory data is done using time-dependent reduction factors. The applicability of this methodology is tested on a case study specific to the steel industry, the ULCOS (Ultra-Low Carbon dioxide Steelmaking) programme.

An attributional life cycle assessment is first carried out in order to identify which parts of the system should be involved in a prospective development. This LCA also enables to compare the potential impacts of different technologies using current data. The results of this preliminary assessment indicate that the new technologies studied have a lower potential impact on climate change compared to the traditional blast furnace production chain, used as the reference technology. Regarding other impact categories (namely acidification, eutrophication, photochemical ozone creation potential, and depletion of abiotic resources), conclusions are mixed. Some technologies have indeed higher impacts for some categories compared to the

reference technology. This has to be kept in mind before future implementation of these technologies in order to prevent shifting of impacts.

Subsequently, prospective developments of this study are carried out. In this prospective study, two potential perspectives of the future are compared: a “business as usual” scenario and a scenario in which GHG emissions are more strictly regulated. This part of the assessment focuses at first on the future evolution of some assumptions related to electricity sources and transportation. The influence of variations in electricity sources is particularly important. The influence of future environmental policies on inventory data is then developed. It is shown to have a major impact on the results. Finally, the different prospective aspects are simultaneously applied to the case study, and the steel production technologies are compared for the year 2050.

For these two scenarios, impacts associated to each technology decrease with time over the period considered (2000-2050). Depending on both technologies and scenarios, potential impacts decrease for instance in 2050 between 15% and 86% for climate change and between 74% and 89% for acidification, compared to initial results without prospective aspects. Therefore, the results of the study are greatly influenced by the prospective approach. Impacts of the whole European steel industry are also modeled using the results obtained for each current and future steel production technology. These results show that a GHG emission reduction of 50% associated to steel production is possible through the development of new technologies. Impacts in other categories would also decrease.

The work presented in this master thesis was carried out for our specific case study. However, the methodology developed is easily adaptable and could be applied and extended to other types of assessment. Nevertheless, its application has highlighted some limits and several recommendations have been addressed in order to improve the approach:

- To refine reduction factors with for instance a regionalisation of reduction objectives;
- To extend the methodology to all the substances of the inventory and to process input data;
- To implement the methodology into databases in order to facilitate its use and to improve precision.

## TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE .....	III
REMERCIEMENTS .....	IV
RÉSUMÉ .....	V
ABSTRACT .....	VIII
TABLE DES MATIÈRES .....	X
LISTE DES TABLEAUX .....	XIV
LISTE DES FIGURES .....	XV
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS .....	XVII
LISTE DES ANNEXES .....	XIX
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE .....	3
1.1 L'analyse du cycle de vie .....	3
1.1.1 Définition et applications .....	3
1.1.2 Méthodologie .....	4
1.1.3 Les limites de l'analyse du cycle de vie .....	8
1.1.4 La problématique temporelle en analyse du cycle de vie .....	9
1.2 L'analyse du cycle de vie prospective .....	12
1.2.1 La prospective .....	12
1.2.2 L'application de la prospective en analyse du cycle de vie .....	14
1.2.3 Les scénarios en analyse du cycle de vie prospective .....	16
1.2.4 L'analyse du cycle de vie et les changements technologiques .....	17
1.3 L'industrie sidérurgique .....	21
1.3.1 L'acier .....	21

1.3.2	Les technologies actuelles de production d'acier .....	22
1.3.3	Des nouvelles technologies de production d'acier : le projet ULCOS .....	25
1.3.4	L'analyse du cycle de vie et l'acier.....	27
1.3.5	L'analyse du cycle de vie et le projet ULCOS .....	28
1.4	Bilan de la revue de littérature .....	29
CHAPITRE 2 OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE DU PROJET.....		31
2.1	Problématique .....	31
2.2	Objectifs.....	31
2.3	Méthodologie du projet et organisation du mémoire .....	32
2.4	Note au lecteur .....	33
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE DÉVELOPPÉE POUR L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE PROSPECTIVE.....		34
3.1	La modélisation des changements technologiques en ACV-P .....	34
3.1.1	Une diminution globale des émissions de polluants .....	34
3.1.2	La relation entre politiques environnementales et évolution technologique .....	37
3.1.3	Proposition d'une méthodologie pour considérer l'évolution technologique en ACV-P.....	38
3.2	Mise en place d'une méthodologie d'ACV-P .....	39
3.3	L'étude de cas appliquée au projet ULCOS .....	40
3.3.1	Objectifs spécifiques à l'étude de cas .....	40
3.3.2	Présentation des données prospectives issues du projet ULCOS. ....	41
3.4	Bilan de l'application de la méthodologie d'ACV-P à l'étude de cas .....	44
CHAPITRE 4 ACV ATTRIBUTIONNELLE DE LA PRODUCTION D'ACIER .....		46
4.1	Objectifs et champ de l'étude de l'ACV.....	46
4.1.1	Objectifs.....	46

4.1.2	Fonction, unité fonctionnelle et flux de référence .....	47
4.1.3	Frontières du système .....	47
4.1.4	Sources de données .....	48
4.1.5	Frontières géographiques et horizon temporel.....	48
4.1.6	Confidentialité des données .....	49
4.2	Collecte des données pour l'inventaire du cycle de vie .....	49
4.2.1	Données technologiques pour les sites de production d'acier .....	49
4.2.2	Données en amont du site de production .....	53
4.2.3	Modélisation du transport .....	53
4.2.4	Gestion des coproduits et des déchets.....	56
4.3	Outils de modélisation et évaluation des impacts .....	57
4.3.1	Évaluation des impacts du cycle de vie .....	57
4.3.2	Outils de modélisation .....	59
4.4	Interprétation des résultats de l'ACV initiale .....	59
4.4.1	Comparaison initiale des technologies.....	59
4.4.2	Analyses de contribution.....	62
4.4.3	Analyse de sensibilité sur la méthode d'EICV .....	66
4.5	Synthèse des résultats .....	68
CHAPITRE 5 DÉVELOPPEMENTS PROSPECTIFS ASSOCIÉS À L'ÉLECTRICITÉ ET AU TRANSPORT.....		69
5.1	Évolution prospective de l'électricité .....	69
5.1.1	Modélisation prospective de la variation du mix électrique .....	69
5.1.2	Évolution des impacts associés à l'électricité.....	70
5.1.3	Influence de la variation de l'électricité sur les résultats.....	71
5.2	Évolution prospective du transport .....	73

CHAPITRE 6	ÉVOLUTION PROSPECTIVE DES TECHNOLOGIES .....	75
6.1	Prise en compte de l'effet des politiques environnementales sur les données d'inventaire .....	75
6.2	Application de la méthodologie .....	76
6.2.1	Le facteur d'ajustement de la croissance des activités.....	77
6.2.2	Le facteur d'ajustement des objectifs de contrôle.....	77
6.2.3	Influence de la variation des objectifs de réduction avec les secteurs .....	82
6.3	Résultats de l'application des facteurs de réduction .....	83
6.3.1	Influence des différentes options sur les résultats.....	84
6.3.2	Influence de la prise en compte des autres substances .....	86
6.3.3	Influence de l'application des facteurs de réduction sur l'inventaire .....	87
CHAPITRE 7	SYNTHÈSE DES RÉSULTATS DE L'ÉTUDE PROSPECTIVE.....	90
7.1	Comparaison des différents aspects prospectifs .....	90
7.2	Comparaison des filières à l'an 2050.....	91
7.3	Impacts associés à la production totale d'acier.....	93
CHAPITRE 8	DISCUSSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS .....	97
8.1	Discussion des résultats .....	97
8.1.1	L'analyse du cycle de vie prospective .....	97
8.1.2	Bilan sur l'étude de cas appliquée à la sidérurgie.....	100
8.1.3	Perspectives d'utilisation des résultats.....	103
8.2	Recommandations techniques liées à l'étude de cas.....	104
8.3	Recommandations liées à la méthodologie.....	105
CONCLUSION	.....	109
RÉFÉRENCES	.....	111
ANNEXES	.....	118

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-1 : Relations entre les ACV-A/ACV-C et ACV rétrospectives/prospectives, adapté de (Sandén & Karlström, 2007; Weidema, 2003) .....	11
Tableau 1-2 : Impacts associés à la production d'acier, adapté de (World Steel Association, 2001) .....	28
Tableau 4-1 : Exemple d'hypothèses pour le transport des matières premières .....	54
Tableau 4-2 : Répartition géographique de la production et de la consommation de minerai de fer .....	55
Tableau 4-3 : Transport du minerai de fer .....	56
Tableau 4-4 : Distances de transport pour le minerai de fer .....	56
Tableau 4-5 : Exemples de coproduits présents sur le site .....	57
Tableau 5-1 : Variation des distances de transport pour le minerai de fer .....	73
Tableau 6-1 : Catégories SNAP .....	79
Tableau 6-2 : Objectifs de réduction pour le dioxyde de soufre, scénario de référence .....	80
Tableau 6-3 : Secteurs SNAP associés aux catégories de l'inventaire dans l'option 2 .....	82
Tableau 6-4 : Secteurs SNAP associés aux catégories de l'inventaire dans l'option 2 bis .....	83
Tableau 6-5 : Secteurs SNAP associés aux catégories de l'inventaire dans l'option 3 .....	83
Tableau 6-6 : Diminution des impacts relatifs pour la filière de référence (scénario de référence) .....	87
Tableau 8-1 : Comparaison prévisions/réalité pour la production d'acier .....	102

## LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Méthodologie générale de l'ACV, adaptée de (ISO, 2006b).....	4
Figure 1-2 : Domaines d'application des méthodes prospectives, adaptée de (Weidema, 2003) ..	16
Figure 1-3 : Cycle de production de l'acier.....	23
Figure 1-4 : Cycle de vie de l'acier.....	27
Figure 2-1 : Méthodologie générale de l'étude .....	32
Figure 3-1 : Évolution des émissions de quelques polluants dans l'UE entre 1990 et 2010.....	35
Figure 3-2 : Évolution des émissions de SO <sub>x</sub> et des plafonds fixés par les protocoles entre 1980 et 2020.....	36
Figure 3-3 : Évolution des émissions de NO <sub>x</sub> et des plafonds fixés par les protocoles entre 1990 et 2020.....	36
Figure 3-4 : Évolutions de la production d'acier entre les années 2000 et 2050 pour le scénario de référence.....	43
Figure 3-5 : Évolutions de la production d'acier entre les années 2000 et 2050 pour le scénario alternatif.....	43
Figure 3-6 : Application de la méthodologie d'ACV-P à l'étude de cas .....	45
Figure 4-1: Frontières du système à l'étude.....	47
Figure 4-2 : Schéma général du site pour la filière de référence .....	51
Figure 4-3 : Exemple pour la modélisation des unités manquantes.....	52
Figure 4-4 : Impacts relatifs des différentes filières à l'instant initial.....	60
Figure 4-5 : Analyse de contribution - filière de référence.....	63
Figure 4-6 : Analyse de contribution - filière G .....	65
Figure 4-7 : Impacts relatifs des différentes filières à l'instant initial avec Impact 2002+ .....	66
Figure 4-8 : Impacts relatifs des différentes filières à l'instant initial avec Impact 2002+, suite ..	67



Figure 5-1 : Évolution des mix électriques européens entre 2000 et 2050 pour les deux scénarios étudiés .....	70
Figure 5-2 : Variation des impacts associés à la production d'électricité selon les deux scénarios étudiés .....	71
Figure 5-3 : Influence de la variation du mix électrique sur l'analyse initiale - catégorie changement climatique .....	72
Figure 5-4 : Influence de la variation du mix électrique sur l'analyse initiale – catégorie acidification.....	72
Figure 6-1 : Comparaison des émissions européennes réelles (traits pleins) et des objectifs de réduction (pointillés).....	81
Figure 6-2 : Impact relatif lié à l'acidification pour la filière de référence (scénario de référence) .....	85
Figure 6-3 : Impact relatif lié à l'eutrophisation pour la filière G (scénario de référence) .....	85
Figure 6-4 : Comparaison des facteurs de réduction - catégorie changement climatique .....	88
Figure 6-5 : Comparaison des facteurs de réduction - catégorie acidification .....	88
Figure 7-1 : Influence des facteurs prospectifs - catégorie changement climatique (sc. de référence, année 2050).....	90
Figure 7-2 : Influence des facteurs prospectifs - catégorie acidification (sc. alternatif, année 2050) .....	91
Figure 7-3 : Impacts relatifs des différentes filières à l'an 2050 (scénario de référence).....	92
Figure 7-4 : Impacts relatifs des différentes filières à l'an 2050 (scénario de référence), suite.....	92
Figure 7-5 : Évolution des impacts liés à la production totale d'acier - catégorie acidification ....	94
Figure 7-6 : Évolution des impacts liés à la production totale d'acier - catégorie changement climatique.....	94
Figure 7-7 : Évolution des impacts associés à la production d'une tonne d'acier dans la catégorie changement climatique .....	96

## LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ACV	Analyse du Cycle de Vie
ACV-A	Analyse du cycle de vie attributionnelle
ACV-C	Analyse du cycle de vie conséquentielle
ACV-P	Analyse du cycle de vie prospective
BBF	<i>Basic Blast Furnace</i>
CEIP	<i>Center on Emission Inventories and Projections</i>
CLRTAP	Convention sur le Pollution Atmosphérique Transfrontalière à Longue Distance
CO <sub>2</sub>	Dioxyde de carbone
COV	Composés Organiques Volatiles
EAF	<i>Electric Arc Furnace</i>
EEA	<i>European Environment Agency</i>
EICV	Évaluation des impacts du cycle de vie
FR	Facteur de réduction
GES	Gaz à effet de serre
HRC	<i>Hot Rolled Coil</i>
ICV	Inventaire du cycle de vie
IIASA	<i>International Institute for Applied Systems Analysis</i>
ISO	Organisation Internationale de Normalisation
MTD	Meilleures Techniques Disponibles
NH <sub>3</sub>	Ammoniac
NO <sub>x</sub>	Oxydes d'azote
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Économiques

ONU	Organisation des Nations Unies
OR	Objectif de réduction
PM	Particules fines en suspension
PNUE	Programme des Nations Unies pour l'Environnement
POLES	<i>Prospective Outlook on Long-term Energy Systems</i>
SNAP	<i>Selected Nomenclature for Air Pollution</i>
SO <sub>x</sub>	Oxydes de soufre
UE	Union européenne (27 pays)
ULCOS	<i>Ultra-Low Carbon Dioxide Steelmaking</i>
USGS	<i>United States Geological Survey</i>

## LISTE DES ANNEXES

ANNEXE I – TERMES TECHNIQUES UTILISÉS EN ANALYSE DU CYCLE DE VIE.....	118
ANNEXE II – ÉVOLUTION DES DISTANCES DE TRANSPORT POUR LE MINÉRAI DE FER .....	121
ANNEXE III – OBJECTIFS DE RÉDUCTION UTILISÉS POUR L'ÉTUDE .....	129
ANNEXE IV – RÉSULTATS DE L'APPLICATION DES FACTEURS DE RÉDUCTION ..	137
ANNEXE V – ÉVALUATION DES IMPACTS ASSOCIÉS À LA PRODUCTION TOTALE D'ACIER .....	144

## INTRODUCTION

Les dernières décennies ont vu apparaître et croître le concept de développement durable. Dans ce contexte, les problématiques environnementales sont de plus en plus prises en considération par les différents acteurs de notre société. Plus particulièrement, l'industrie est amenée à jouer un rôle majeur dans la transformation de notre société, car elle est à la base de la production de tous les biens et services que nous consommons. Parmi les secteurs industriels, la sidérurgie joue un rôle fondamental dans le mode de vie actuel. L'acier est en effet utilisé dans tous les domaines, que ce soit la construction de nos infrastructures, la fabrication d'appareils électroniques ou le secteur des transports. L'industrie sidérurgique est donc pleinement concernée par la notion de développement durable. Dans ce concept de durabilité, l'acier est aujourd'hui un matériau indéfiniment recyclable ou réutilisable. Les ferrailles, c'est-à-dire les aciers usagés, sont en effet recyclables par une voie dite secondaire qui consiste à les fondre et à réintroduire la fonte obtenue dans la chaîne de fabrication de l'acier.

Un des principaux défis de la sidérurgie en lien avec le développement durable concerne cependant la problématique du réchauffement climatique, causée par les émissions de gaz à effet de serre (GES). La sidérurgie est aujourd'hui l'un des principaux secteurs industriels émetteurs de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), qui est le principal GES libéré dans notre atmosphère. Le secteur industriel représentait, en 2010, 20% des émissions européennes de gaz à effet de serre, et 19% des émissions de ce secteur proviennent de la sidérurgie (European Environment Agency, 2012). C'est donc presque 4% des émissions européennes de  $\text{CO}_2$  qui sont causées à ce jour par la fabrication d'acier. La diminution de ces émissions est par conséquent un enjeu majeur pour cette industrie. Avec les technologies actuelles de production d'acier à partir de minerai de fer, la formation de ce gaz est néanmoins inévitable, car elle découle des réactions physicochimiques de réduction du minerai de fer en présence d'oxygène et de charbon. Au fil du temps, ces réactions ont été optimisées pour réduire la quantité de  $\text{CO}_2$  émise par tonne d'acier produite, mais la diminution de cette émission ne peut descendre plus bas que le bilan de matière de ces réactions.

Pour faire face à cette problématique, de nouveaux procédés de production d'acier sont en développement avec pour objectif de diminuer encore plus les émissions de GES associées à l'industrie sidérurgique. C'est dans cette optique que le projet ULCOS (*Ultra-Low Carbon*

*dioxyde Steelmaking*) a été lancé en 2004 (Consortium ULCOS, 2012). Regroupant les principales entreprises sidérurgiques européennes ainsi que plusieurs autres partenaires industriels et universitaires, il a pour objectif de réduire de manière drastique les émissions de dioxyde de carbone associées à la production d'acier. La première phase du projet s'est achevée en 2010 et a permis de sélectionner les technologies les plus prometteuses. Leur étude est aujourd'hui approfondie dans la seconde phase en cours. Les limites physiques liées aux réactions actuelles étant atteintes, ces nouvelles technologies présentent des pistes innovantes comme la capture du CO<sub>2</sub> en sortie des procédés ou une modification radicale des réactions de production en passant par exemple par l'électrolyse du minerai de fer.

Les impacts de nos actions sur l'environnement ne se résument cependant pas simplement au réchauffement climatique. Une évaluation environnementale globale de ces nouvelles technologies est donc nécessaire pour vérifier qu'elles ne conduisent pas à un déplacement des impacts vers d'autres catégories ou d'autres phases du cycle de vie de l'acier. Néanmoins, ces nouvelles technologies sont en cours de développement et ne seront implantées à l'échelle industrielle que dans les années ou décennies à venir. Un aspect prospectif doit donc indispensablement être associé à cette évaluation pour visualiser l'influence du temps sur les résultats. Ce mémoire propose d'utiliser l'analyse du cycle de vie (ACV) comme outil pour réaliser cette évaluation environnementale de procédés sidérurgiques. Cette approche holistique permet en effet d'évaluer les impacts potentiels sur l'environnement de processus constituant l'ensemble du cycle de vie d'un produit. La revue de littérature présentée dans le chapitre 1 vise à identifier les enjeux liés à cette application de la prospective en analyse du cycle de vie.

## **CHAPITRE 1    REVUE DE LITTÉRATURE**

La première partie de cette revue de littérature s'intéresse à l'analyse du cycle de vie. Le cas plus spécifique de l'analyse du cycle de vie prospective est ensuite développé dans la deuxième section. La troisième partie de la revue présente l'industrie sidérurgique, qui est le cas d'étude choisi dans ce mémoire. Un bilan de cette revue de littérature est finalement posé dans la dernière partie de ce chapitre pour faire ressortir les lacunes identifiées.

### **1.1 L'analyse du cycle de vie**

#### **1.1.1 Définition et applications**

Les dernières décennies ont été marquées par une prise de conscience de plus en plus importante des problématiques environnementales. Il apparaît désormais évident que les activités humaines doivent s'accorder avec les contraintes de notre environnement. Dans cette optique, un certain nombre d'outils d'aide à la décision sont apparus pour identifier les problèmes reliés à l'environnement et en faciliter la compréhension. L'analyse du cycle de vie (ACV), qui est l'un de ces outils, vise à évaluer les impacts environnementaux potentiels d'un produit, service ou activité tout au long de son cycle de vie.

Historiquement, la méthodologie de l'ACV a été développée par l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), la Société de Toxicologie et Chimie Environnementales (SETAC) et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) (Frischknecht & Rebitzer, 2005; Guinée et al., 2010). Elle est aujourd'hui régie par les normes ISO 14040 (Organisation Internationale de Normalisation [ISO], 2006b) et ISO 14044 (Organisation internationale de normalisation [ISO], 2006a) qui la définissent comme une « compilation et évaluation des intrants, des extrants et des impacts environnementaux potentiels d'un système de produits au cours de son cycle de vie ». La notion de cycle de vie permet de considérer toutes les phases consécutives d'un système de produit qui sont principalement l'extraction des matières premières, la fabrication du produit, la distribution, l'utilisation et la fin

de vie. Cette approche holistique a le principal avantage d'éviter le déplacement d'impacts entre les différentes étapes du cycle de vie.

Les domaines d'application de l'analyse du cycle de vie sont nombreux et variés (Jolliet, Saadé, & Crettaz, 2005; Organisation Internationale de Normalisation [ISO], 2006b) :

- Le développement de produits et en particulier l'écoconception (identification des points environnementaux sensibles, comparaison de différentes options, ...)
- Le marketing (écolabels, communication externe, ...)
- La prise de décision (communication interne, planification stratégique, ...)
- La mise en place de politiques publiques

Par cette diversité d'applications, l'ACV est utilisée par toutes sortes d'acteurs, que ce soit les multinationales, les PME, ou les organismes gouvernementaux et non gouvernementaux (Rebitzer et al., 2004).

### 1.1.2 Méthodologie

Selon les normes ISO lui étant associées, la méthodologie de l'analyse du cycle de vie se décompose en quatre grandes étapes, détaillées dans les paragraphes suivants. Elles sont la définition des objectifs et du champ de l'étude, l'inventaire du cycle de vie (ICV), l'évaluation des impacts du cycle de vie (EICV) et l'interprétation des résultats. Comme le montre la Figure 1-1, ces étapes sont interdépendantes, dans le sens où certaines conclusions peuvent pousser à revoir des hypothèses précédentes. L'ACV est donc une méthode itérative.

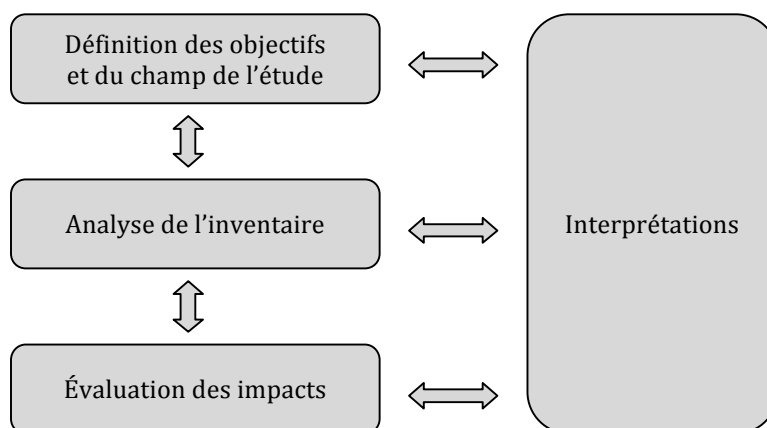


Figure 1-1 : Méthodologie générale de l'ACV, adaptée de (ISO, 2006b)



### **1.1.2.1 Objectifs et champ de l'étude**

La définition des objectifs de l'étude permet de fixer les domaines d'application des résultats qui dépendent du public ciblé. Cette étape va donc guider la démarche mise en place pour l'analyse.

La définition de champ de l'étude doit ensuite correspondre aux objectifs fixés précédemment et permettre de les réaliser. Elle fixe les frontières du système étudié ainsi que certains paramètres essentiels à la mise en place du problème comme les fonctions du système, l'unité fonctionnelle, le flux de référence, les méthodes d'allocation ou la qualité des données. Les définitions de tous ces termes techniques utilisés en ACV sont énoncées dans les normes ISO (ISO, 2006b) et reproduites en Annexe I.

Parmi ces paramètres, le plus important pour l'étude est l'unité fonctionnelle qui se définit selon la norme ISO comme la « performance quantifiée d'un système de produits destinée à être utilisée comme unité de référence dans une analyse du cycle de vie ». À cette unité correspondent un ou plusieurs flux de référence qui sont des valeurs quantitatives de produits ou services nécessaires pour la remplir.

### **1.1.2.2 Inventaire du cycle de vie**

La phase d'inventaire du cycle de vie (ICV) a pour objectif de comptabiliser, sur l'ensemble du cycle de vie, tous les flux élémentaires entrants (ressources extraites ou surfaces occupées) et sortants (polluants émis) des frontières du système. Ces données recueillies sont mises à l'échelle pour correspondre avec les flux de référence, puis les résultats obtenus sont ensuite agrégés par substance et milieu d'émission pour faciliter l'étape d'évaluation des impacts.

Cette étape d'ICV est souvent la plus longue et la plus laborieuse, car elle fait intervenir un très grand nombre d'informations. Les données utilisées peuvent provenir de données collectées sur le terrain (données primaires) ou de données de la littérature. Cependant, la complexité de cette étape nécessite souvent l'utilisation de bases de données génériques (données secondaires). Ces bases sont développées soit par des initiatives publiques comme par exemple le centre ecoinvent (Frischknecht & Rebitzer, 2005), soit par des initiatives privées, qui fournissent plutôt des données par secteurs industriels (Rebitzer et al., 2004), comme par exemple la World Steel Association pour l'acier (World Steel Association, 2010).

Une des grandes différences entre les bases de données repose sur leur degré d'agrégation. Une donnée totalement désagrégée ne représente qu'un seul processus et qu'une seule étape du cycle de vie. Cependant, les données peuvent être agrégées horizontalement, par exemple en moyennant les données de plusieurs usines ayant le même produit, ou verticalement, c'est-à-dire en regroupant dans une même donnée plusieurs étapes d'un cycle de vie. L'agrégation diminue le niveau de détail des données, ce qui peut nuire à leur interprétation, mais accélère l'analyse en réduisant les calculs nécessaires. Elle est motivée par divers facteurs comme la confidentialité des données, la préservation d'un modèle d'affaires, la préservation de l'intégrité des données, la dissimulation de certains problèmes environnementaux ou tout simplement la facilitation de l'analyse (United Nations Environmental Program [UNEP], 2011).

### **1.1.2.3 Évaluation des impacts du cycle de vie**

Cette troisième phase consiste à transformer les données répertoriées à la phase d'inventaire en impacts potentiels sur l'environnement. Elle se décompose selon les normes ISO en trois étapes obligatoires (sélection des catégories d'impact, classification et caractérisation), qui sont indispensables pour calculer les impacts, et en trois autres étapes facultatives (normalisation, regroupement, pondération), qui ont pour objectif de faciliter la compréhension des résultats et la prise de décision.

La transposition des données de l'inventaire (entrants et sortants du système) en impacts potentiels sur l'environnement est effectuée grâce à la multiplication de ces données par des facteurs de caractérisation. La valeur des facteurs de caractérisation est influencée par de nombreux paramètres comme la chaîne de cause à effet considérée, l'emplacement géographique ou l'horizon de temps (Pennington et al., 2004). Différentes méthodes d'impact peuvent donc être utilisées lors de l'étape d'EICV et elles varient selon les hypothèses sélectionnées. Les méthodes Impact 2002+, CML, ReCiPe, ou LUCAS en sont des exemples (European Commission JRC-IES, 2010).

Lors de l'étape de caractérisation, les facteurs de caractérisation sont appliqués et conduisent à l'obtention de scores d'impacts qui peuvent être divisés en deux niveaux : problèmes (ou *midpoint*) et dommages (ou *endpoint*). Les catégories d'impacts niveau problème (acidification, eutrophisation, toxicité, ...) sont des catégories intermédiaires qui peuvent être regroupées en catégories niveau dommage (santé humaine, qualité des écosystèmes, ...) pour

diminuer le nombre d'indicateurs et se concentrer sur les aires de protections (Jolliet, Saadé, & Crettaz, 2005).

#### **1.1.2.4 Interprétation**

Comme son nom l'indique, cette dernière étape permet d'interpréter les résultats obtenus dans les trois précédentes. En fait, dans la pratique, elle a lieu tout le long de l'analyse. Pour vérifier la robustesse des hypothèses et des résultats, elle peut recourir à des études de complétude, de cohérence, de sensibilité ou d'incertitudes (ISO, 2006b). Une discussion sur les limites de l'analyse et une critique des hypothèses sont aussi souvent comprises dans cette étape. Au final, les conclusions et recommandations de l'analyse sont établies en fonction des résultats et des objectifs établis initialement.

#### **1.1.2.5 Les différents types d'analyses en ACV**

Les analyses du cycle de vie peuvent se classer en deux catégories, dépendamment de la perspective selon laquelle elles sont conduites : les ACV dites « attributionnelles » (ACV-A) et les ACV dites « conséquentielles » (ACV-C) (Ekvall & Weidema, 2004). La première catégorie correspond à une perspective comptable et consiste à une simple description d'un système de produits alors que la seconde est axée sur la modélisation des effets du changement. L'ACV-A illustre la vision traditionnelle de l'ACV en considérant un cycle de vie figé (Earles & Halog, 2011). L'ACV-C considère la façon dont les liens entre l'environnement et le système sont modifiés lors de perturbations dans le cycle de vie étudié (Rebitzer et al., 2004; Tillman, 2000). D'une part, cette prise en considération des changements nécessite l'identification des technologies marginales, c'est-à-dire celles qui sont affectées par les modifications dans la production (Rebitzer et al., 2004; Weidema, 2003) et, d'autre part, la modélisation des variations de l'offre et la demande par des modèles économiques. Le choix d'utiliser une perspective ou une autre dépend de l'application attendue de l'étude (Tillman, 2000; Weidema, 2003). Il se fait donc en fonction des objectifs définis dans la première étape de l'analyse.

### 1.1.3 Les limites de l'analyse du cycle de vie

Bien que l'ACV soit de plus en plus utilisée, elle présente certaines limites. Une des principales est la subjectivité associée à certains choix effectués lors de l'application de la méthode. En effet, les résultats dépendent fortement des choix effectués par l'analyste lors des différentes phases. Les hypothèses posées lors de la définition du système ou le choix de la méthode d'impact sont, par exemple, des facteurs déterminants sur les résultats (Jolliet, Saadé, & Crettaz, 2005). Les résultats d'une ACV sont aussi souvent difficilement communicables (nombreuses catégories ou catégories peu claires pour le grand public), ce qui nécessite de recourir à des étapes subjectives comme la normalisation ou la pondération. La fiabilité de l'analyse repose donc sur la transparence de l'analyste.

Outre leur choix, les méthodes d'impact en elles-mêmes sont aussi sujettes à des critiques. Le calcul des impacts se fait avec des incertitudes très variées selon les catégories, ce qui est difficilement communicable et peut conduire à des erreurs dans l'interprétation des résultats. De plus, seuls les impacts pour lesquels les mécanismes sont connus et compris sont inclus dans les méthodes d'impact. La prise en compte des impacts omis dans les résultats pourrait alors changer les conclusions de l'étude, ce qui doit être pris en compte lors de l'interprétation des résultats.

Un autre facteur limitant dans l'utilisation de cet outil est sa complexité. Il nécessite une grande quantité de données, un temps long et souvent le recours à une personne ayant une expertise solide dans le domaine. Par ailleurs, les données en elles-mêmes sont aussi source de problèmes, car elles peuvent être difficilement accessibles, différer selon la source ou ne pas correspondre à la qualité définie dans les objectifs (ISO, 2006b).

L'impact des résultats de l'analyse sur les consommateurs est aussi une limite à cette méthode (Jolliet, Saadé, & Crettaz, 2005). En effet, les résultats peuvent modifier des comportements (par exemple, en augmentant la consommation de produits ayant un faible impact jusqu'à dépasser celui du produit remplacé) et avoir une influence positive ou négative sur l'environnement et la santé humaine. Par sa focalisation sur les aspects environnementaux, l'analyse du cycle de vie omet aussi les aspects sociaux et économiques. Il est donc important de considérer ces aspects dans d'autres parties de l'étude pour avoir une vision plus globale et axée sur les trois piliers du développement durable.

Une dernière limite touche plus la méthodologie et les aspects temporels et géographiques du cycle de vie. Selon la durée et la distance entre les étapes du cycle de vie, les émissions répertoriées peuvent avoir lieu dans des lieux très éloignés les uns des autres dans l'espace et dans le temps. Cependant, la méthodologie actuelle présuppose une agrégation spatiale et temporelle des données, ce qui peut conduire à de nombreuses approximations (Reap, Roman, Duncan, & Bras, 2008a). Le paragraphe qui suit détaille plus précisément cette problématique des aspects temporels en ACV.

### **1.1.4 La problématique temporelle en analyse du cycle de vie**

La problématique temporelle intervient dans toutes les étapes de l'analyse du cycle de vie, que ce soit les étapes d'inventaire et d'évaluation des impacts ou celle de mise en place des objectifs et de définition du système. Par sa considération limitée ou simplifiée du temps, l'analyse du cycle de vie traditionnelle ne permet pas de refléter les dynamiques environnementales et industrielles (Reap, Roman, Duncan, & Bras, 2008b).

#### **1.1.4.1 La problématique temporelle dans les phases d'ICV et d'EICV**

Comme expliqué dans la partie 1.1.3, lors de la réalisation de l'inventaire du cycle de vie, toutes les émissions sont actuellement agrégées à l'instant initial alors qu'elles peuvent avoir lieu à des instants très éloignés et sur des durées différentes (Owens, 1997; Pettersen & Hertwich, 2008). Les données sur la dynamique des émissions sont donc perdues dès la phase d'inventaire (Collet, Hélias, Lardon, & Steyer, 2011).

En conséquence de cette perte d'informations, la phase d'évaluation des impacts est elle aussi touchée par ce manque d'informations temporelles. Les modèles actuellement utilisés sont en régime permanent. Des facteurs comme l'accumulation de polluants, les effets tampons ou les seuils d'effets sont alors ignorés (Udo de Haes, 2006). Par conséquent, toutes les émissions ont un effet et les impacts sont cumulatifs alors que cela ne représente pas toujours la réalité (Owens, 1997; Reap, Roman, Duncan, & Bras, 2008b). Ce facteur est particulièrement problématique pour la caractérisation des impacts toxiques, comme ceux dus aux métaux (Pettersen & Hertwich, 2008). Mais, d'autres impacts comme l'eutrophisation ou la formation d'ozone photochimique

présentent des variations temporelles en fonction des saisons ou même du moment de la journée qui ne sont pas prises en compte (Udo de Haes et al., 2002).

La prise en compte de cette problématique temporelle par les chercheurs est un phénomène tout récemment considéré et quelques solutions ont été envisagées pour y répondre. Une méthode d'impact utilisant des facteurs de caractérisation dynamiques a été développée pour la catégorie changement climatique (Levasseur, Lesage, Margni, Deschênes, & Samson, 2010) et devrait être étendue à d'autres catégories dans le futur. Elle permet de prendre en compte la distribution temporelle des émissions dans le calcul d'impacts sur le réchauffement climatique. Cette approche s'inscrit dans le cadre méthodologique d'une nouvelle catégorie d'ACV, appelée analyse du cycle de vie dynamique.

Pour pouvoir appliquer cette méthode dynamique d'évaluation des impacts, la désagrégation temporelle des données d'inventaire actuelles est nécessaire. De récents travaux se penchent sur la mise en place d'un inventaire considérant les variations temporelles des émissions tout le long du cycle de vie (Beloïn-Saint-Pierre & Blanc, 2011). Toutes les émissions ne doivent cependant pas nécessairement être réparties dans le temps, mais un effort peut être mis sur celles qui en sont les plus dépendantes et qui contribuent le plus aux impacts (Collet, Hélias, Lardon, & Steyer, 2011). Sans forcément désagréger précisément l'inventaire d'un point de vue temporel, l'utilisation de facteurs de réduction pour relativiser des émissions plus lointaines ou la séparation de l'inventaire en deux catégories de temps (court-terme et long-terme) peuvent aussi être des solutions pour résoudre ce problème (Pettersen & Hertwich, 2008; Udo de Haes et al., 1999).

Un autre aspect temporel dans les méthodes d'évaluation des impacts est le choix des horizons de temps (Reap, Roman, Duncan, & Bras, 2008b). Les facteurs de caractérisation sont en effet calculés par une intégration des impacts sur une période donnée, définie par un horizon de temps. Le choix de cet horizon, qui diffère selon les méthodes et les catégories d'impacts, peut influencer les résultats et introduit donc une part de subjectivité dans l'étape d'EICV. Un horizon de temps infini permet de considérer tous les impacts (Udo de Haes et al., 2002), mais cet horizon ne considère pas une éventuelle évolution et adaptation de la société future. À l'opposé, un horizon de temps fini permet de se concentrer sur les impacts à court terme et plus certains (Udo de Haes et al., 1999), mais le choix de cet horizon est subjectif et aucun consensus n'existe

quand à sa sélection (Reap, Roman, Duncan, & Bras, 2008b). En utilisant la méthode d'analyse du cycle de vie dynamique présentée précédemment, le choix de l'horizon temporel est laissé libre à l'utilisateur. Il est alors possible de tester plus précisément la sensibilité de ce paramètre.

#### 1.1.4.2 Les variations temporelles dans la phase de définition des objectifs et du champ de l'étude

Les objectifs et les hypothèses posés pour l'étude permettent de fixer sa période de validité temporelle. Ainsi, certaines études sont rétrospectives, dans le sens où elles concernent des processus passés ou en cours, alors que d'autres sont prospectives, c'est-à-dire qu'elles s'intéressent à des impacts potentiels futurs (Sandén & Karlström, 2007). Ces termes rétrospectifs et prospectifs peuvent poser problème car ils ont initialement été utilisés pour distinguer les ACV attributionnelles et conséquentielles (2000). Cependant, les ACV-A et ACV-C peuvent être à la fois rétrospectives ou prospectives, comme le montre le tableau ci-dessous.

Tableau 1-1 : Relations entre les ACV-A/ACV-C et ACV rétrospectives/prospectives, adapté de (Sandén & Karlström, 2007; Weidema, 2003)

	Attributionnelle	Conséquentielle
Rétrospective	Allouer les responsabilités pour des actions passées (Qui doit-on blâmer pour la façon dont les choses sont ?)	Identifier les conséquences d'un choix passé (Que se serait-il passé si on avait ou n'avait pas fait ça ?)
Prospective	Allouer les responsabilités pour des actions futures (Qui doit-on blâmer pour la façon dont les choses vont devenir ?)	Prévoir les conséquences de décisions actuelles ou futures (Que se passera-t-il si on fait ou ne fait pas ça ?)

Parmi ces deux visions temporelles, l'analyse du cycle de vie prospective (ACV-P) est une méthode encore assez récente. La partie 1.2 en détaille la méthodologie et les enjeux.

## **1.2 L'analyse du cycle de vie prospective**

Dans un premier temps, la prospective, dans son sens général, est présentée. L'application de la prospective dans le cas particulier de l'ACV est ensuite présentée dans la deuxième partie. L'utilisation de scénarios y étant particulièrement présente, elle est développée dans un troisième temps. Finalement, le dernier paragraphe est consacré à la prise en compte de l'évolution technologique dans l'ACV-P.

### **1.2.1 La prospective**

La notion de prospective est aujourd'hui présente dans de nombreux domaines, mais elle est souvent employée hors de son sens initial. Le présent paragraphe vise à en montrer le sens premier, puis à faire le lien entre cette notion et le contexte du développement durable qui est au cœur de ce projet.

Historiquement, le terme de « prospective » a émergé sous différentes formes dans la seconde moitié du XXème siècle (De Jouvenel, 2004; Miles, 2010). Aux États-Unis, il apparaît initialement sous l'influence de l'armée via l'étude de progrès techniques militaires (De Jouvenel, 2004) pour se répandre ensuite à d'autres domaines. En France, « la prospective » est lancée dans les années 1950 par le philosophe Gaston Berger (1964). Elle est alors vue comme une philosophie qui suggère que l'on peut atteindre une vision donnée du futur en agissant sur le présent. Elle sous-entend donc une certaine liberté de l'homme face à des avenir nombreux et indéterminés (Godet, 2007). Fondamentalement, la prospective se distingue donc de la divination ou de la prévision en opposant à leur vision déterministe du monde une vision qui tend plutôt à prendre en main son destin. Elle ne prétend pas deviner le futur, mais cherche plutôt à comprendre les liens entre présent et futur et à construire ainsi différents scénarios conséquents aux actions présentes. Par cette vision anticipatrice, la prospective est aujourd'hui omniprésente dans maints domaines d'activités et accompagne de nombreux processus de décision.

Les études prospectives peuvent ainsi toucher des domaines variés en lien avec la société humaine et ses activités. La prospective démographique, par exemple, s'intéresse à l'évolution de la population dans une région donnée en se basant sur l'étude de paramètres démographiques comme le vieillissement ou le taux de natalité. Un autre exemple d'études prospectives



couramment menées est la prospective énergétique qui vise à prévoir l'utilisation des différentes sources d'énergie ainsi que l'évolution de la consommation et de la disponibilité des ressources énergétiques. De nombreux organismes internationaux tels que l'Agence Internationale de l'Énergie publient régulièrement leurs prévisions dans ce domaine (Agence Internationale de l'Énergie, 2012).

Dans le domaine des sciences et de la technologie, l'utilisation de la prospective est un peu plus récente. Elle est en particulier introduite dans la littérature anglophone par le terme « *foresight* » via des auteurs comme Irvine et Martin (1984) en opposition à un terme plus ancien, « *forecasting* », se référant plus aux travaux de prédiction (Martin, 2010; Miles, 2010). La prospective est définie par Martin (1995) comme « un procédé regardant le futur à long terme de la science, la technologie, l'économie et la société dans le but de sélectionner des axes de recherche et des technologies émergentes permettant d'atteindre les meilleurs bénéfices sociaux et économiques ». À l'inverse, une approche prédictive se rapprocherait plutôt de la notion de rétrospective, c'est-à-dire de la projection dans le futur des tendances passées. Elle est surtout utilisée pour des études à court terme et faible incertitude (Rasmussen, Borup, Borch, & Andersen, 2005) et se base sur des méthodes statistiques (extrapolations du passé, courbes d'apprentissage) ou des modèles économétriques (De Jouvenel, 2004).

La problématique du développement durable est elle aussi largement concernée par la prospective dans le sens où celle-ci permet d'évaluer les conséquences de nos actions sur les générations futures (Godet, 2010), ce qui est un des principes du développement durable tel que défini dans le rapport Brundtland (United Nations, 1987). La prospective peut alors être utilisée pour étudier la disponibilité des ressources ou les problématiques de pollution en fonction de différents développements possibles pour l'humanité. Un exemple concret d'application de la prospective au développement durable est le travail réalisé dans le cadre de l'Évaluation des écosystèmes pour le millénaire (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Cette étude commandée par l'ONU a évalué les conséquences des modifications subies par les écosystèmes sur les services écologiques nécessaires à la vie humaine. En particulier, une des parties de l'étude était consacrée au développement de quatre grands scénarios représentant les effets de quatre voies distinctes de développement sur les services écosystémiques et le bien-être humain. Les tendances représentées étant assez extrêmes, le futur devrait se situer entre ces différentes options.

Dans cette optique de prévoir les futurs impacts sur l'environnement, différents outils sont disponibles. Ils sont souvent des adaptations de méthodes développées initialement pour étudier les impacts du présent, telle que l'analyse du cycle de vie. Ainsi, l'analyse du cycle de vie prospective est une méthode qui vise à étudier les futurs cycles de vie de produits, procédés ou services. Contrairement à la notion de « prospective » présentée dans ce paragraphe, ce terme est utilisé ici indifféremment pour des études prédictives ou prospectives.

### **1.2.2 L'application de la prospective en analyse du cycle de vie**

L'utilisation de l'ACV-P étant encore très récente, il existe peu de publications présentant explicitement la démarche à suivre pour son application. La plus complète est celle proposée par Weidema (2003) et qui se compose de cinq étapes :

1. La détermination des parties du système concernées : elle nécessite souvent une bonne connaissance du système étudié et une analyse préliminaire pour identifier les processus du cycle de vie les plus importants ou les plus influençables par les aspects temporels.
2. La détermination des détails nécessaires : elle vise à préciser les attentes pour chaque partie identifiée dans la première étape. Les détails dépendent de plusieurs facteurs comme la vitesse et la direction du développement pour la technologie considérée.
3. Le choix des méthodes prospectives pertinentes : six groupes de méthodes sont identifiés par Weidema et développés dans la suite de ce paragraphe.
4. L'application de la méthode : elle consiste à utiliser les méthodes sélectionnées précédemment sur chaque partie du système identifiée à la première étape.
5. La vérification de la cohérence : elle vise à s'assurer que les hypothèses posées ne sont pas contradictoires. Cette étape est particulièrement importante si des méthodes prospectives différentes sont utilisées pour l'étude.

Pour la troisième étape, les outils disponibles pour développer des données prospectives peuvent être regroupés en six grandes catégories non exclusives (Ekvall & Weidema, 2004; Pehnt, 2003; Pesonen et al., 2000; Weidema, 2003) :

- L'extrapolation consiste à représenter le futur comme une extension du passé. Pour ce faire, elle se base sur des données statistiques ou de la littérature. Différents outils comme les séries temporelles, les régressions, les analyses de tendances ou les courbes d'apprentissage sont utilisés. Les tendances passées et actuelles sont alors étendues au futur. Cette méthode est plutôt employée pour des prévisions à court et moyen termes, dans des secteurs où l'évolution est lente.
- La modélisation consiste à identifier les mécanismes actuels et passés déterminants et à modéliser leurs effets combinés pour représenter le futur. Le modèle construit repose alors sur des paramètres clés qui sont interdépendants. Les mécanismes sont identifiés par des analyses du passé, mais la prise en compte de leurs interrelations permet des prévisions à plus long terme que pour les méthodes extrapolatives.
- La méthode participative se base sur les opinions d'experts sur les aspects considérés. Les résultats comportent donc une part de subjectivité et sont plus axés sur une vision idéaliste du futur ou sur une description des futurs probables. Les outils employés sont par exemple la méthode Delphi (consultation d'experts soumis à plusieurs vagues de questionnements pour mettre en évidence des convergences), les enquêtes d'opinion ou les panels d'experts. Cette méthode est souvent utilisée pour servir de base à d'autres catégories comme la modélisation ou la méthode par scénarios.
- La méthode exploratoire cherche à identifier tous les futurs possibles en combinant des techniques analytiques et des techniques imaginatives. Les premières fournissent une description qualitative des possibilités futures tandis que les secondes permettent de compléter les parties manquantes. Les visions représentées sont donc nombreuses et variées.
- La méthode normative représente une vision voulue du futur et décrit la route à suivre pour y arriver. Elle nécessite donc de fixer ce futur puis de construire de manière rétrospective les étapes nécessaires jusqu'au moment présent.
- La méthode par scénarios considère que le futur est trop incertain pour être prédit. Par conséquent, il ne peut y avoir un seul futur, mais plutôt plusieurs options. Elle combine alors certains aspects des précédentes méthodes (participation, modélisation, exploration) pour créer plusieurs scénarios représentant différentes visions du futur.

Pour résumer, les méthodes permettent de représenter le futur de différentes façons : comment il pourrait être (méthodes exploratoires), comment il devrait être (méthodes normatives) ou comment il est probable qu'il soit (extrapolation, modélisation) (Weidema, 2003). La Figure 1-2 présente l'utilisation de ces méthodes en fonction des domaines d'application de l'analyse du cycle de vie.

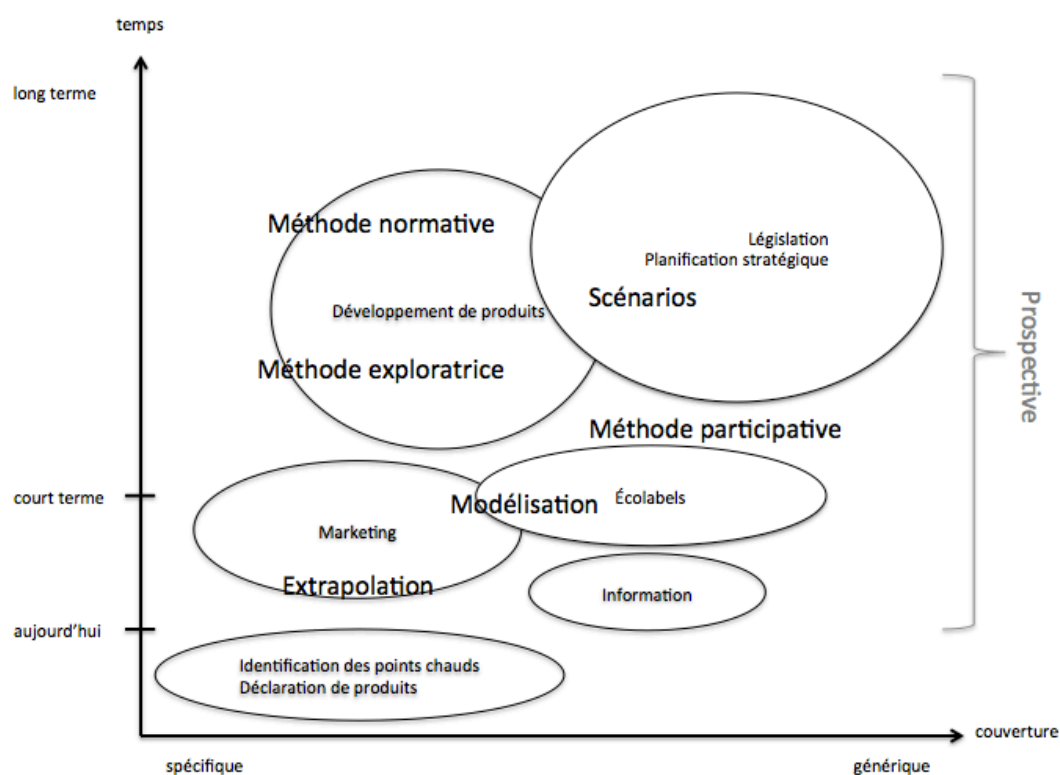


Figure 1-2 : Domaines d'application des méthodes prospectives, adaptée de (Weidema, 2003)

### 1.2.3 Les scénarios en analyse du cycle de vie prospective

Il existe plusieurs définitions du mot « scénario » tel qu'il est employé en ACV-P. Celle retenue est celle proposée par Pesonen (2000): « un scénario est une description d'une situation future possible et pertinente pour des applications spécifiques à l'ACV, basée sur des hypothèses spécifiques sur le futur et incluant aussi (lorsque c'est pertinent) la présentation des développements entre le présent et le futur ».

Le développement des scénarios a plutôt lieu lors de la phase de définition des objectifs et du champ de l'étude, mais leur influence est présente à toutes les étapes de l'ACV (Weidema et al., 2001). Selon la méthode employée, un grand nombre de scénarios peuvent être identifiés. Il n'est cependant pas toujours pertinent ou possible de les utiliser tous en analyse du cycle de vie. Dans la plupart des cas, un scénario de base (où tout continue comme d'habitude) est comparé à un petit nombre (entre un et cinq) d'autres scénarios qui représentent des variations de celui de base (Pesonen et al., 2000). Dans le cas où les ressources nécessaires au développement de scénarios ne sont pas disponibles, trois scénarios standards basés sur les trois perspectives hiérarchique, égalitaire et individualiste peuvent aussi être utilisés (Weidema et al., 2001). La perspective individualiste résonne à court terme et considère que le progrès technologique va permettre d'éviter les problèmes dans le futur. À l'opposé, la perspective égalitaire est basée sur le long terme et applique un principe de précaution. La perspective hiérarchique représente un consensus entre les deux.

## **1.2.4 L'analyse du cycle de vie et les changements technologiques**

L'un des principaux défis en analyse du cycle de vie prospective est la prise en compte des changements technologiques. La relation entre l'analyse du cycle de vie et l'évolution technologique est néanmoins réciproque : d'un côté, les changements technologiques doivent être pris en compte dans l'analyse du cycle de vie prospective et, de l'autre, l'analyse du cycle de vie est un outil de la prospective technologique qui vise au développement de nouvelles technologies et à l'évaluation des changements associés (Rasmussen, Borup, Borch, & Andersen, 2005).

### **1.2.4.1 L'ACV comme outil du développement technologique**

Comme expliqué dans la partie 1.1, un des domaines d'application de la prospective est le développement de nouvelles technologies ou de nouvelles politiques en matière de technologies. Parmi les outils disponibles dans ce domaine, l'analyse du cycle de vie peut être utilisée pour appuyer certaines études (Jonasson & Sandén, 2004). Ce lien entre l'analyse du cycle de vie et les études de prospective technologique, développé par exemple par Rasmussen (2005), permet d'ajouter une perspective environnementale à ces études. L'auteur présente dans sa publication une approche hybride entre prospective technologique et analyse du cycle de vie qui se veut

applicable à toutes les échelles de la prospective technologique : de la plus petite comme le développement d'une technologie spécifique à la plus large comme la mise en œuvre de politiques technologiques.

Une des applications concrètes de l'analyse de cycle de vie dans l'évolution technologique est son rôle dans la détermination des Meilleures Techniques Disponibles (MTD ou BAT, *Best Available Technology*). Pour un secteur d'activité et un procédé donnés, les MTD correspondent aux techniques qui ont le plus faible impact environnemental et qui sont viables à l'échelle industrielle (Union Européenne, 1996). L'utilisation de l'analyse du cycle de vie dès la phase de recherche et développement de nouveaux procédés permet d'identifier les critères de performance environnementale et de comparer différentes options de développement pour orienter la recherche vers les techniques correspondant aux MTD (Barton, Schneider, & Jager, 2002). L'utilisation d'une approche axée sur le cycle de vie dans l'évaluation de ces technologies permet d'englober à la fois les impacts causés par les techniques en elles-mêmes et ceux dus à l'arrière-plan, c'est-à-dire les autres processus du cycle de vie nécessaires à la mise en place de ces technologies (Nicholas, Clift, Azapagic, Walker, & Porter, 2000). Elle peut par exemple permettre d'évaluer des procédés comme la cogénération qui, même s'ils sont plus polluants sur le site qu'une simple disposition des déchets, vont conduire à éviter l'importation d'électricité et donc diminuer l'impact global associé à la technique étudiée. Suite à l'implémentation des MTD sur des sites de production, l'analyse du cycle de vie permet aussi de vérifier que la performance environnementale prévue par ces technologies a bien été atteinte (Valderrama et al., 2012).

#### **1.2.4.2 La modélisation de l'évolution technologique en ACV-P**

Que ce soit pour analyser diverses perspectives de développement technologique ou pour simplement évaluer un produit futur, une des principales difficultés de l'analyse du cycle de vie prospective est la modélisation et l'acquisition de données concernant ces changements technologiques.

En ACV-P, les changements technologiques sont un aspect non négligeable. En effet, les technologies et leurs performances s'améliorent avec le temps (Frijia, Guhathakurta, & Williams, 2011; Jonasson & Sandén, 2004; Weidema et al., 2001). Cette amélioration a pour conséquence une diminution des émissions des procédés et des entrants (matières premières et énergie). La prise en compte du changement technologique dans les analyses du cycle de vie de produits

futurs est cependant une hypothèse hasardeuse car cette évolution est incertaine (Frischknecht, Büsser, & Krewitt, 2009). Il est donc conseillé d'utiliser plusieurs scénarios de développement technologique pour en présenter différentes hypothèses et quantifier les incertitudes et probabilités associées (Ekvall & Weidema, 2004; Rasmussen, Borup, Borch, & Andersen, 2005).

L'évolution technologique n'est pas toujours synonyme de diminution des émissions : si par exemple le design du procédé est modifié ou si l'emplacement de la technologie est moins favorable, elles peuvent aussi augmenter par rapport au cas actuel (Frischknecht, Büsser, & Krewitt, 2009). Un exemple d'augmentation des impacts avec le temps est l'extraction de certains minerais. Lorsque les stocks disponibles diminuent, le métal extrait est de moins en moins pur et les émissions par masse de métal produite peuvent alors augmenter (Memary, Giurco, Mudd, & Mason, 2012).

Pour prendre en compte cette évolution, des courbes d'apprentissage ou des études de prospective technologique peuvent être utilisées (Arvesen & Hertwich, 2012). L'évaluation du changement technologique peut aussi se baser sur des données de modélisations numériques, de laboratoire ou d'installations pilotes. Cependant, la performance d'une technologie peut différer entre ces étapes de leur développement et leur mise en place à l'échelle industrielle (Frischknecht, Büsser, & Krewitt, 2009; Hospido, Davis, Berlin, & Sonesson, 2010; Valderrama et al., 2012; Walser, Demou, Lang, & Hellweg, 2011). Ce facteur doit donc être pris en compte dans l'étude même s'il n'est pas toujours facile de le mesurer, en particulier pour des technologies émergentes (Wender & Seager, 2011). Le challenge de la modélisation du développement technologique varie en effet selon le secteur d'activités considéré. L'analyse du cycle de vie a récemment été utilisée pour évaluer des technologies émergentes alors qu'habituellement elle s'intéresse plus à des industries matures (Wender & Seager, 2011). Pour ces industries émergentes comme les nanotechnologies, le manque de données et de connaissances est beaucoup plus important, ce qui y rend plus difficile l'application de l'ACV. Une des solutions pour transformer des données de laboratoire ou d'installations existantes en données futures est l'utilisation de relations de mise à l'échelle comme les lois de puissance. Ces lois s'appliquent avec d'assez bonnes corrélations à la production d'équipements industriels (Frischknecht, Büsser, & Krewitt, 2009). Caduff (2012) montre par exemple qu'il est possible de relier la hauteur et le diamètre du rotor d'une éolienne aux émissions de CO<sub>2</sub> associées à l'électricité qu'elle produit.

De plus, l'application de l'analyse du cycle de vie aux technologies en développement pose plusieurs problèmes méthodologiques (Pehnt, 2003). L'allocation ou l'expansion des frontières pour la prise en compte des coproduits est plus difficile car il faut en prévoir leur utilisation future. L'évolution technologique ne concerne pas seulement les données de premier plan, c'est-à-dire celle contrôlée par l'analyste, mais aussi les données d'arrière-plan qui lui sont moins connues. La modélisation des changements pour ces données, dont un des exemples est le changement de mix électrique, est beaucoup plus complexe mais elle doit être prise en compte car elle peut affecter les données de premier plan (Hospido, Davis, Berlin, & Sonesson, 2010). En outre, un des problèmes majeurs pour ces nouvelles technologies est le manque de données. Il peut être causé par plusieurs facteurs comme le manque de connaissances, la confidentialité des données, leur complexité ou le fait que le procédé soit encore en développement (Pehnt, 2003). Pour résoudre ce problème, les solutions envisageables sont semblables à celles proposées dans le contexte plus général de l'ACV-P. Parmi celles-ci, les plus pertinentes sont l'extrapolation de tendances actuelles, la modélisation numérique des nouvelles technologies, l'adaptation des données existantes ou l'appel aux jugements d'experts (Pehnt, 2003).

Cette partie a montré les difficultés liées à l'évaluation de nouvelles technologies et a relevé quelques solutions proposées dans la littérature pour y faire face. Ce travail servira de base pour l'analyse préliminaire effectuée dans le chapitre 4 de ce projet, qui concerne aussi en partie des technologies en développement.

#### **1.2.4.3 L'évolution technologique et les données actuelles**

Un autre point à souligner dans la relation entre développement technologique et analyse du cycle de vie est l'influence du premier sur les données utilisées pour la seconde. L'utilisation de données actuelles pour modéliser des technologies futures est incorrecte car, avec le temps, les changements de technologie vont conduire à des changements dans les entrants et sortants des processus.

Parmi les quelques travaux se penchant sur cet aspect, celui effectué dans le cadre du projet NEEDS présente une solution intéressante pour pallier ce problème (ESU-services, 2008). Ce projet, terminé en 2009, avait pour objectif d'évaluer les bénéfices et les coûts de futurs systèmes d'énergie et de politiques énergétiques au niveau de l'Union européenne. Pour quantifier les externalités liées aux impacts sur l'environnement, des analyses du cycle de vie



prospectives ont été effectuées. Ces ACV-P ont, bien entendu, dû faire face aux différents problèmes présentés dans cette partie 1.3. En particulier, les données d'arrière-plan, dues à certains processus clefs (transport, métaux, électricité, matériaux de construction), ont dû être modifiées pour prendre en compte l'influence du temps. Pour cela, plusieurs scénarios ont été posés pour représenter l'évolution des technologies actuelles. Sur chaque processus identifié comme clef, une étude a été entreprise pour identifier les meilleures technologies disponibles, c'est-à-dire des MTD. À partir de ces nouvelles données, les processus actuels ont été modifiés pour se rapprocher plus ou moins, selon le scénario choisi, des efficacités et des émissions de ces MTD. Cette modification des données d'arrière-plan pour leur utilisation dans des analyses du cycle de vie prospectives permet de prendre en compte une première évolution de l'inventaire, utilisée dans le projet NEEDS pour évaluer les impacts entre les années 2000 et 2050. Cette solution ne semble cependant valable que pour un court horizon de temps. À un horizon aussi long, des technologies inexistantes ou inconnues vont apparaître et doivent aussi être considérées. Parmi les publications trouvées à ce sujet, il n'existe pas de solution satisfaisante permettant de modéliser ce facteur de façon simple. Cette lacune doit être comblée pour améliorer la réalisation des analyses du cycle de vie prospectives.

## **1.3 L'industrie sidérurgique**

### **1.3.1 L'acier**

L'acier est un alliage de fer et de carbone. La proportion massique de carbone y est inférieure à 2 % (Béranger, 2006). Au-dessus de cette valeur, le métal formé prend le nom de fonte. D'autres éléments chimiques comme par exemple le chrome, le nickel ou le manganèse peuvent être ajoutés à l'alliage pour en modifier les propriétés et obtenir différentes nuances d'acier (Yellishetty, Mudd, & Ranjith, 2011).

De nos jours, l'acier est l'un des matériaux les plus répandus à travers le monde. Il se retrouve dans les domaines de la construction, de l'automobile, des emballages, de l'électronique et dans bien d'autres secteurs. Sa production annuelle, qui était de 1490 millions de tonnes en 2011 (World Steel Association, 2012), croît rapidement, suit l'influence de la demande croissante des pays en développement. À cause de cette augmentation de la production et de problématiques

liées au développement durable, les technologies de production d'acier sont en constante évolution. Le paragraphe 1.5.3 expose des nouvelles technologies envisagées dans le cas particulier du projet ULCOS (Consortium ULCOS, 2012) pour répondre à cette évolution. Les technologies actuelles sont présentées dans le paragraphe qui suit.

### 1.3.2 Les technologies actuelles de production d'acier

Traditionnellement, la fabrication de l'acier peut s'effectuer selon différentes filières :

- La filière par haut fourneau (BBF : *basic blast furnace*)
- La filière par réduction directe (principalement par le procédé MIDREX)
- La filière par four à arc électrique (EAF : *electric arc furnace*)

Les deux premières voies sont dites primaires car elles utilisent majoritairement du minerai de fer, alors que la troisième est dite secondaire car basée sur l'utilisation de ferrailles. La voie secondaire représentait en 2010 29% de la production mondiale d'acier et 42% de la production européenne (World Steel Association, 2012). Pour la voie primaire, la filière par haut fourneau représente la quasi-totalité de la production (95%). Ces trois voies de production se divisent en trois grandes étapes, dont les deux dernières sont indépendantes de la filière :

- La métallurgie primaire qui consiste à fabriquer l'acier liquide « brut »
- La métallurgie secondaire où la composition de l'acier est régulée à l'aide de processus de purification et d'ajouts d'éléments
- La mise en forme (coulée et laminage) suivie des éventuels traitements

La Figure 1-3 représente le cycle de production de l'acier, qui est ensuite détaillé dans les paragraphes 1.3.2.1 et 1.3.2.2.

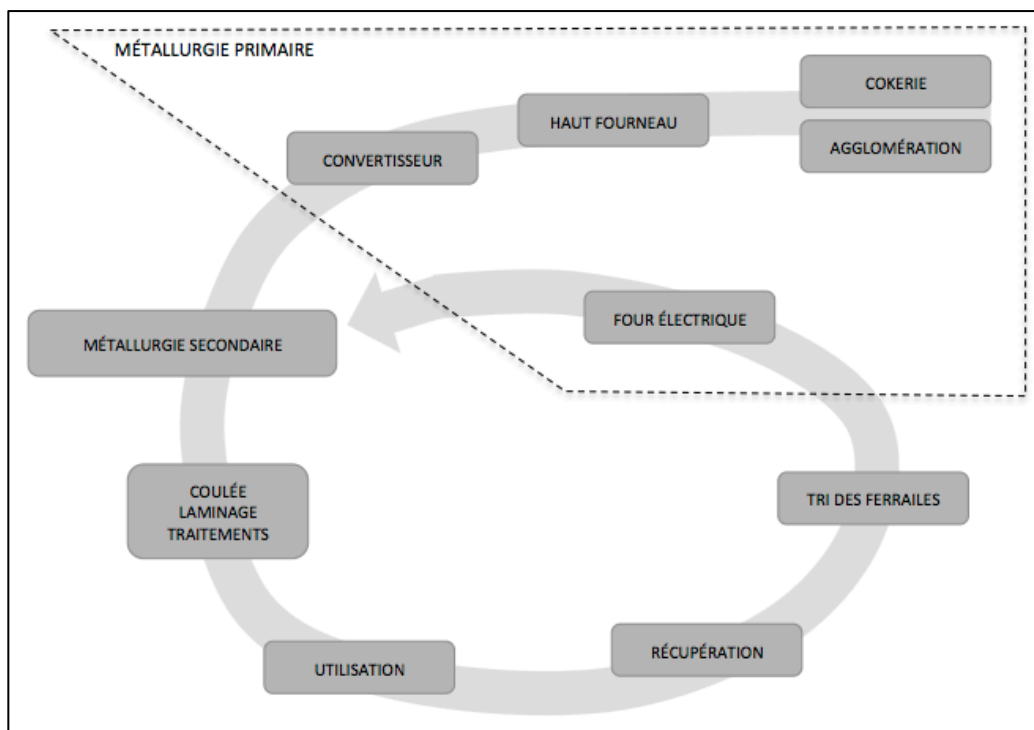


Figure 1-3 : Cycle de production de l'acier

### 1.3.2.1 La métallurgie primaire

Dans la voie traditionnelle par haut fourneau, la métallurgie primaire se décompose en plusieurs unités : la cokerie, l'agglomération, le haut fourneau et le convertisseur à oxygène. Cette filière est souvent nommée filière intégrée, car elle regroupe toutes les unités sur le même site et le complexe sidérurgique possède une grande capacité de production (de 1 à 10 Mt par an) (Astier, 2009).

Le rôle de la cokerie est de fabriquer du coke à partir du charbon. Elle utilise un mélange de différents charbons pour obtenir les propriétés voulues. Ce mélange forme la pâte à coke qui, après préparation, est cuite dans un four à coke. Le coke formé est ensuite refroidi et criblé à la taille nécessaire pour le haut fourneau.

L'unité d'agglomération permet la préparation des fines de minerais de fer destinées au haut fourneau. Elle inclut une étape d'homogénéisation et de grossissement des particules ainsi qu'une cuisson. Cette étape de traitement thermique permet de dissocier les hydrates et carbonates des minerais ou des fondants et donc de préparer le minerai à sa réduction dans le haut

fourneau. On distingue deux types d'agglomération : l'agglomération sur grille (*sintering*) et l'agglomération sur boulettes (*pelletizing*) selon la taille du minerai utilisé.

Le haut fourneau est l'étape principale de la filière. Il a pour but de réduire et de fondre le fer contenu dans les minerais. En plus du coke et de l'aggloméré produits dans les étapes précédentes, il consomme du charbon et de l'oxygène. Le haut fourneau dispose d'un profil spécifique qui est étudié et indispensable au bon déroulement de la réaction. En fonctionnant comme un réacteur chimique à contre-courant (les solides sont introduits par le haut alors que le gaz est formé par combustion de l'air à la base), il permet de réaliser les différentes réactions nécessaires à la production de la fonte et du laitier. Ce laitier est composé d'oxydes non réduits dans le haut fourneau qui peuvent provenir de la gangue du minerai, des additions ou des cendres de coke. Ce coproduit est souvent valorisé selon diverses méthodes (agrégat, clinker, ...). La fonte, quant à elle, rassemble les éléments réduits au cours de l'opération. Elle est donc composée de fer (environ 95%), de carbone (environ 4%) et de divers autres éléments (P, S, Si, ...).

Le convertisseur à oxygène est l'étape transformant la fonte en acier liquide. En plus de la fonte, des ferrailles internes et externes et de la chaux sont chargées dans le four. Par soufflage ou injection d'oxygène pur, le carbone et les impuretés présentes dans la fonte sont oxydés. L'addition de minéraux et la régulation du temps de soufflage permettent de contrôler la composition de l'acier en sortie du convertisseur. Comme pour le haut fourneau, un laitier est formé et récupéré. D'un autre côté, de l'acier « brut » est obtenu.

Dans les deux autres filières de production d'acier, le cheminement est plus court. Elles font toutes les deux intervenir un four à arc électrique où l'énergie nécessaire à la fonte est fournie par des arcs électriques jaillissant entre les électrodes en graphite et la charge. La composition du métal y est contrôlée par insufflation d'oxygène et ajout de minéraux et de chaux. Il y a par ailleurs formation de laitiers qui sont aussi récupérés. Dans la filière par réduction directe, le minerai de fer subit une étape d'agglomération (pelletisation) puis est réduit dans un four, avec comme principal agent réducteur le gaz naturel. Le fer réduit obtenu (DRI : *direct reduced iron*) est ensuite transformé en acier dans le four à arc électrique. Dans la voie secondaire, les ferrailles externes et internes sont directement introduites dans un four à arc électrique.

### **1.3.2.2 La métallurgie secondaire, mise en forme et traitements**

La métallurgie secondaire a lieu dans une poche d'aciérie qui est le lieu de rassemblement des aciers provenant du convertisseur et du four à arc électrique. Elle permet d'obtenir une uniformité en composition et en température et de contrôler la composition de l'acier pour former la nuance voulue en ajoutant des éléments d'alliage.

Pour finir, le métal subit des étapes de mise en forme et de traitement. Par la coulée, l'acier liquide passe à l'état solide. Cette étape peut être continue (procédé récent et majoritaire) ou en lingots. Elle produit des brames, des blooms ou des billettes selon le produit final souhaité. Les demi-produits de la coulée continue passent ensuite par l'étape de laminage. Celui-ci a lieu soit à chaud, soit à froid. Il permet la mise en forme du produit. Dans le laminage à chaud, le demi-produit est réchauffé dans un four puis il passe successivement entre plusieurs cylindres tournants à sens inverse. Il en découle un amincissement et donc un allongement du produit. Les procédés diffèrent selon le type de produit voulu et son utilisation. Dans certains cas, le laminage à chaud ne permet pas d'obtenir un produit assez fin. Le laminage à froid est alors utilisé : l'acier froid, issu du laminage à chaud, est traité, lubrifié avec de l'huile, puis il passe entre des cylindres de laminage. Cette méthode fragilisant le métal, il subit ensuite un recuit pour retrouver une structure homogène. Les étapes de laminage puis de découpe permettent donc la fabrication du produit final (tôles, plaques, fils, ...). Pour terminer, le produit peut subir des étapes de revêtements, comme par exemple la galvanisation, le chromage ou l'étamage. Ce revêtement peut se faire par trempe ou par électrodéposition. Il permet de protéger le métal lors de son utilisation future.

### **1.3.3 Des nouvelles technologies de production d'acier : le projet ULCOS**

L'industrie sidérurgique étant actuellement l'un des principaux émetteurs de gaz à effet de serre dans le secteur industriel, les technologies actuelles de production d'acier vont devoir évoluer pour s'adapter aux efforts de plus en plus importants de diminution des émissions de GES. Afin de trouver des solutions répondant à cette problématique, le projet ULCOS (pour Ultra-Low Carbon dioxyde Steelmaking) a été amorcé en 2004. Regroupant les principales entreprises sidérurgistes européennes ainsi que plusieurs autres partenaires industriels et

universitaires, il a pour objectif de réduire de manière drastique les émissions de dioxyde de carbone associées à la production d'acier. Après une première phase qui s'est achevée en 2010, les technologies les plus prometteuses ont été sélectionnées et leur étude est approfondie dans la seconde phase en cours. Dans toutes ces nouvelles filières, les étapes de métallurgie secondaire et de mise en forme sont identiques à celles des filières traditionnelles. Les technologies retenues dans le projet sont les suivantes :

- le haut fourneau avec recyclage des gaz au sommet (TGRBF)
- le haut fourneau avec utilisation de biomasse
- le procédé de réduction directe avec capture du CO<sub>2</sub> (ULCORED)
- la filière par fusion-réduction (HISARNA)
- l'électrolyse du minerai de fer par voie aqueuse (ULCOWIN)
- la pyro-électrolyse de minerai de fer (ULCOLYSIS)

Le TGRBF est une filière semblable à la voie traditionnelle par haut fourneau mais, en sortie du haut fourneau, les gaz sont traités : le CO<sub>2</sub> est capturé et stocké alors que les gaz restants sont réinjectés à la base du haut fourneau. Ils y servent d'agent de réduction et remplacent donc une partie du coke. De même, le procédé ULCORED ressemble à la filière actuelle par réduction directe mais le CO<sub>2</sub> émis lors de la réduction directe est capturé et stocké.

Le haut fourneau avec utilisation de biomasse est aussi très semblable à la filière traditionnelle. La seule différence est l'utilisation de charbon de bois, issu de la carbonisation de biomasse, à la place de la moitié du charbon normalement utilisé dans la voie traditionnelle. Cet ajustement du procédé permet d'utiliser et d'émettre en partie du carbone biogénique à la place de carbone fossile.

La filière par fusion-réduction est quant à elle plutôt nouvelle. Elle consiste à regrouper trois technologies en un unique procédé : le préchauffage du charbon et la pyrolyse partielle, la fusion du minerai dans un cyclone et la réduction du minerai dans une cuve. Le charbon et le minerai de fer sont introduits dans la cuve et sont réduits dans un bain en présence d'oxygène pur. Ce regroupement des étapes traditionnelles permet d'augmenter leurs efficacités et de diminuer les émissions de gaz à effet de serre. La fonte ainsi obtenue passe ensuite dans un convertisseur à oxygène où elle est transformée en acier.

Les deux dernières filières par électrolyse convertissent directement les oxydes de fer en fer liquide. Elles ne nécessitent que l'électricité comme source d'énergie. L'absence d'utilisation de charbon évite alors la formation de CO<sub>2</sub> dans les fours ou réacteurs. Dans le cas de ULCOWIN, l'électrolyse a lieu dans une solution aqueuse de soude, à une température d'environ 110°C. Le fer obtenu est ensuite transformé en acier par passage dans un four à arc électrique. Dans le cas de ULCOLYSIS, l'électrolyse se déroule à une température légèrement supérieure à celle de fusion de l'acier (environ 1600°C). De l'acier est directement obtenu et envoyé à la métallurgie secondaire.

### 1.3.4 L'analyse du cycle de vie et l'acier

L'acier est présent dans de nombreuses analyses du cycle de vie car il est l'un des matériaux les plus utilisés au monde. Par exemple, la plupart des moyens de transport actuels comportent au moins un élément fabriqué en acier. Il est donc rare de réaliser une ACV dans laquelle l'acier n'intervient pas, même si avec l'agrégation des données dans les bases, ce n'est pas toujours directement visible. Les données d'inventaire associées à la production d'acier sont donc souvent utilisées dans la plupart des études ACV.

Le cycle de vie de l'acier, présenté dans la Figure 1-6, est assez complexe car il présente plusieurs boucles de recyclage de ferrailles entre les différentes étapes. Lors de la mise en forme des pièces d'acier et de leur assemblage, les résidus de coupe et de fabrication sont entièrement recyclables et servent donc de matière première à l'usine sidérurgique. En fin de vie, l'acier est aussi souvent recyclé, ce qui doit être pris en compte lors des ACV utilisant ce matériau.

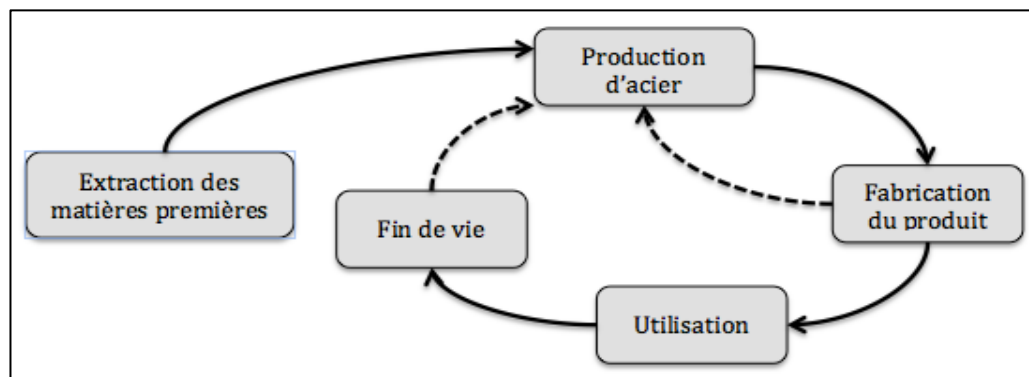


Figure 1-4 : Cycle de vie de l'acier

Le Tableau 1-2 illustre quelques impacts associés à la production d'acier selon les données de la World Steel Association (World Steel Association, 2001). Dans le cadre de son travail sur l'analyse du cycle de vie, cette association regroupant les principaux fabricants d'acier au monde publie régulièrement des données d'inventaire et un rapport (World Steel Association, 2001) qui détaille les différentes étapes définies par les normes ISO et explique les choix méthodologiques qui ont été pris pour la réalisation de leur base d'inventaire. La démarche présentée représente un état de l'art pour toute ACV de l'acier.

Tableau 1-2 : Impacts associés à la production d'acier, adapté de (World Steel Association, 2001)

Produit (pour 1kg)	Réchauffement climatique (kg CO <sub>2</sub> eq)	Acidification (kg SO <sub>2</sub> eq)	Eutrophisation (kg P eq)	Création d'ozone photochimique (kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq)
sections	1,6	0,0037	0,00036	0,0006
bobines laminées à chaud	2,0	0,0052	0,00035	0,00094
acier galvanisé	2,5	0,0074	0,00048	0,0012

Les résultats de ce tableau montrent que les impacts associés à la production d'acier augmentent lorsque l'on avance dans la chaîne de fabrication de l'acier, ce qui s'explique par l'ajout d'étapes et donc d'émissions supplémentaires. Une autre problématique de l'analyse du cycle de vie qui n'est pas présentée dans ce tableau est la diminution des ressources abiotiques (Yellishetty, Mudd, & Ranjith, 2011). L'industrie sidérurgique étant une grande consommatrice de minerai de fer, de charbon et de métaux divers utilisés pour les alliages, l'épuisement des stocks de ces matières touche directement cette industrie et doit être pris en compte dans les analyses du cycle de vie de l'acier.

### 1.3.5 L'analyse du cycle de vie et le projet ULCOS

Dans le cadre du projet ULCOS, des analyses de cycle de vie ont été menées dans les premières années de développement du projet sur certaines filières de production d'acier (Millar, 2008). Ces analyses ont été utilisées pour vérifier que la diminution des impacts sur le changement climatique pour les nouvelles technologies ne conduisait pas à un déplacement des



impacts vers d'autres catégories. Cependant, cette étude ayant été effectuée dans les toutes premières années du projet, peu de données étaient encore disponibles sur les différentes filières et celles-ci ont évolué depuis. Ces travaux présentent donc un premier aperçu des impacts potentiels pour chaque technologie mais leur validité est aujourd'hui discutable.

De plus, une ébauche d'étude prospective a été appliquée pour évaluer l'impact de futurs scénarios sur l'évaluation environnementale de ces technologies. Un facteur de réduction linéaire de 50% entre 2000 et 2050 est appliqué aux émissions de l'inventaire pour représenter leur diminution avec le temps. La valeur de ce facteur correspond à un objectif de diminution des émissions de GES mais il est appliqué indifféremment à toutes les émissions de l'inventaire dans les études réalisées. Cette hypothèse est aussi assez limitante car il paraît peu probable que toutes les émissions vont diminuer de la même façon. L'application d'une méthodologie prospective plus précise permettrait donc d'améliorer cette analyse.

## **1.4 Bilan de la revue de littérature**

Cette revue de littérature a permis de présenter le contexte général de ce mémoire avec l'introduction de l'analyse du cycle de vie et la présentation de la sidérurgie. Plus spécifiquement, une approche particulière de l'analyse du cycle de vie, appelée analyse du cycle de vie prospective, a été mise en évidence. Elle permet de considérer l'influence du temps dans la réalisation d'une ACV. Peu de publications ont été trouvées dans ce domaine assez singulier, que ce soit sur le développement d'une méthodologie cadre ou sur des études de cas plus spécifiques. L'utilisation de l'analyse du cycle de vie prospective comme outil d'aide à la décision pourrait cependant s'avérer très intéressante. Les recherches sur ce sujet méritent donc d'être approfondies.

Dans cette approche prospective, la problématique de la prise en compte de l'évolution technologique est un challenge assez complexe et une des lacunes de la méthode actuelle. Ce facteur a une influence non négligeable sur les données utilisées dans la phase d'inventaire, mais il apparaît dans un premier temps difficile de prédire tous ces changements technologiques vu la grande diversité des données et le fait qu'elles soient souvent en arrière-plan, c'est-à-dire hors du

contrôle direct de l'analyste. Une attention particulière est donc à porter sur la modélisation de ce facteur en ACV-P.

Dans le cas particulier de la sidérurgie, une ébauche d'étude prospective a été trouvée dans le cas du projet ULCOS. Les hypothèses pour cette étude sont toutefois relativement simplistes et il serait utile de les revoir et d'approfondir l'étude effectuée. De plus, l'acier étant un des matériaux au cœur de notre société, il apparaît utile d'étudier les impacts sur l'environnement qui devraient être associés à sa production future.

## **CHAPITRE 2 OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE DU PROJET**

### **2.1 Problématique**

La sidérurgie est aujourd'hui l'un des plus gros émetteurs de gaz à effet de serre dans le secteur industriel. L'acier étant un matériau omniprésent dans notre société et en production croissante, des solutions doivent être trouvées pour lutter contre cette pollution et se préparer aux futures réglementations dans ce domaine. Dans ce contexte, la prospective joue un rôle fondamental comme outil d'aide à la décision future. En particulier, l'analyse du cycle de vie prospective est un outil stratégique pour évaluer la performance environnementale de nouvelles technologies et guider l'innovation technologique. L'application de l'ACV-P à des technologies de production d'acier actuellement en développement va donc permettre de fournir des informations utiles et de vérifier l'adéquation entre leur développement et les objectifs environnementaux fixés.

Il n'existe cependant actuellement que peu de travaux dans le domaine de l'analyse du cycle de vie prospective. Un intérêt croissant est donc identifié à l'identification et au développement d'une méthodologie d'ACV-P ainsi qu'à la réalisation d'études de cas pour fournir des exemples d'applications dans ce domaine. Parmi les lacunes de l'ACV-P, la considération des changements technologiques a été identifiée dans la revue de littérature comme un facteur important pour lequel peu de solutions existent.

### **2.2 Objectifs**

L'objectif principal de ce projet est de développer une méthodologie d'analyse du cycle de vie prospective applicable à l'industrie sidérurgique. Pour atteindre cet objectif, deux objectifs spécifiques ont été posés.

Le premier consiste à améliorer la méthodologie actuelle d'analyse du cycle de vie prospective en y intégrant une méthode permettant de prendre en considération l'évolution des technologies.

Le second objectif spécifique de ce projet est de tester cette méthode sur une étude de cas spécifique appliquée à la sidérurgie.

## 2.3 Méthodologie du projet et organisation du mémoire

La méthodologie suivie pour répondre à ces objectifs est présentée dans cette section et résumée à la Figure 2-1.

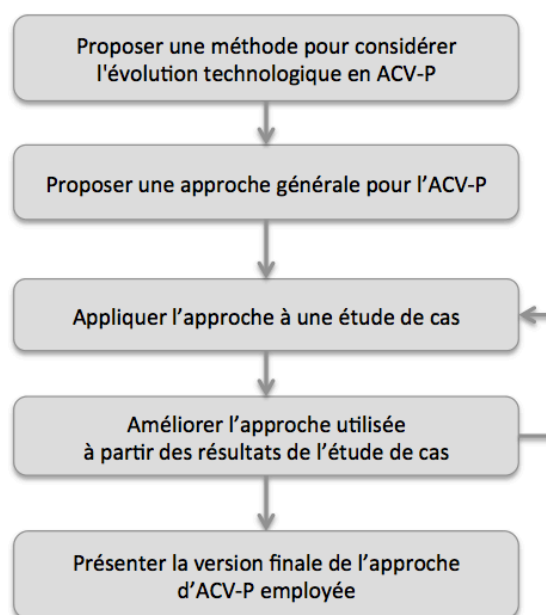


Figure 2-1 : Méthodologie générale du projet

Dans un premier temps, une approche spécifique pour considérer les évolutions technologiques a été identifiée et une méthodologie permettant son intégration à l'analyse du cycle de vie prospective a été proposée. Cette méthodologie fut ensuite testée sur une étude de cas spécifique à l'industrie sidérurgique. En fonction des résultats et des limites identifiées, l'approche prospective utilisée est améliorée de façon itérative, en affinant par exemple les méthodes prospectives et les données utilisées. La démarche a été considérée comme concluante lorsque les principaux aspects prospectifs étaient clairement identifiés et que les solutions proposées pour les résoudre étaient pertinentes et précises.

L'approche générale proposée est développée dans le chapitre 3 de ce mémoire. Par la suite, les chapitres 4 à 7 sont consacrés à l'application des différentes étapes de cette méthodologie sur l'étude de cas. Avant de conclure, le chapitre 8 discute des résultats de ce mémoire et présente quelques recommandations techniques liées à l'étude de cas et d'autres, plus méthodologiques, liées à la méthodologie d'analyse du cycle de vie prospective employée.

L'étude de cas choisie pour ce mémoire est l'évaluation de la performance environnementale de différentes technologies de production d'acier développées dans le cadre du projet ULCOS. Ce projet a été conduit en partenariat avec ArcelorMittal et a fait l'objet d'un stage au centre de recherche de la société à Maizières-les-Metz, en France. Ce stage a permis de se familiariser avec le projet ULCOS et d'accéder à des informations spécifiques indispensables à la conduite de cette étude de cas.

## **2.4 Note au lecteur**

Ce mémoire est basé sur l'étude de nouvelles filières de production d'acier développées dans le cadre du projet ULCOS. Ce projet est actuellement en phase de recherche et développement et représente un enjeu majeur pour la sidérurgie européenne. Par conséquent, les données utilisées dans les analyses du cycle de vie de ce mémoire sont en grande partie confidentielles. Pour garantir cette confidentialité, les données d'inventaire utilisées ne sont que sommairement présentées dans ce mémoire. En outre, le nom des filières étudiées n'est pas directement communiqué lors de la présentation des résultats, mais il est simplement remplacé par des lettres de l'alphabet. Par ailleurs, aucune valeur absolue ne sera communiquée dans ce mémoire. Les résultats sont présentés dans l'ACV-A du chapitre 4 en impacts relatifs par rapport à la filière de référence, puis dans la suite du mémoire en résultats relatifs par rapport à ceux calculés pour l'année 2000.

Ces restrictions ne sont cependant pas un frein à la compréhension des travaux effectués. Ils peuvent conduire à de légères imprécisions dans la présentation des résultats, en particulier pour l'analyse de contribution du paragraphe 4.4.2, mais la philosophie du mémoire reste inchangée. La comparaison des impacts entre les nouvelles filières et les filières traditionnelles de production d'acier, qui constitue un des principaux objectifs de cette étude de cas, est facilement interprétable sans ces précisions.

## **CHAPITRE 3      MÉTHODOLOGIE DÉVELOPPÉE POUR L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE PROSPECTIVE**

Ce chapitre a pour objectif de présenter la méthodologie d'analyse du cycle de vie prospective développée dans ce mémoire ainsi que son cas d'application. Dans un premier temps, une lacune identifiée dans la revue de littérature, la modélisation des changements technologiques, est approfondie et une méthodologie spécifique est proposée pour la combler. Une méthodologie générale d'analyse du cycle de vie prospective est ensuite proposée. À la fin de ce chapitre, l'étude de cas sur le projet ULCOS est présentée.

### **3.1 La modélisation des changements technologiques en ACV-P**

Cette partie a pour objectif de proposer une méthode novatrice permettant de considérer dans une démarche prospective l'évolution des émissions due aux changements technologiques. Ces deux aspects étant principalement reliés par l'application des politiques environnementales, le lien entre émissions de polluants et politiques environnementales est présenté dans un premier temps, puis dans un second, celui entre politiques environnementales et évolution technologique est mis en évidence.

Comme il sera vu plus tard, le cas d'étude de ce projet se concentre sur des impacts principalement associés aux émissions de polluants atmosphériques transfrontaliers. Ce sont donc ces émissions qui ont été choisies dans cette partie pour illustrer le raisonnement.

#### **3.1.1 Une diminution globale des émissions de polluants**

À l'échelle des pays industrialisés, les émissions de polluants atmosphériques ont diminué ces dernières décennies. Le graphique 3-1 illustre la diminution des émissions de quelques polluants à l'échelle de l'Union Européenne entre les années 1990 et 2010, en se basant sur l'année 1990 comme référence (Center on Emission Inventories and Projections [CEIP], 2012).

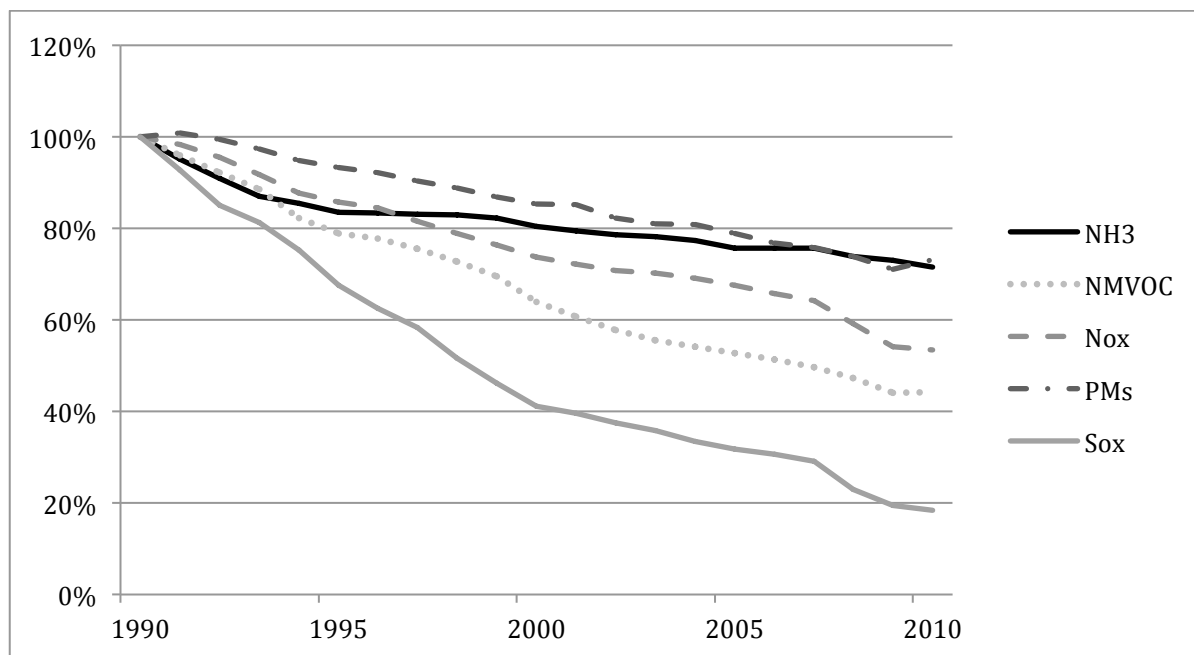


Figure 3-1 : Évolution des émissions de quelques polluants dans l'UE entre 1990 et 2010

Sans incitatif extérieur, les émetteurs ont peu de raisons de diminuer leurs émissions. La lutte contre la pollution environnementale passe donc par une contrainte extérieure, qui est souvent celle de l'État. Pour légiférer en matière de régulation des émissions et de lutte contre la pollution, les États vont souvent fixer des objectifs de réduction des émissions. Ces objectifs, exprimés en pourcentage des émissions par rapport à une année de référence, fixent à différents horizons de temps des diminutions d'émissions à respecter pour atteindre certains objectifs environnementaux. Par exemple, si l'objectif est de diminuer l'acidification aquatique, des cibles vont être fixées pour des substances acidifiantes comme les oxydes de soufre ( $\text{SO}_x$ ) et d'azote ( $\text{NO}_x$ ). Ces cibles sont exprimées en pourcentage de réduction des émissions totales à une échelle régionale puis, pour atteindre ces objectifs, les gouvernements vont les transformer en politiques environnementales.

Dans le cas de pollutions transfrontalières, ces objectifs sont souvent fixés en accord avec des organismes internationaux. Si l'on prend l'exemple des émissions d'oxydes de soufre et d'azote, les Figures 3-2 et 3-3 présentent l'évolution de leurs émissions à l'échelle de l'Union européenne et des plafonds issus de protocoles signés dans le cadre de la Convention sur la Pollution Atmosphérique Transfrontière à Longue Distance (CLRTAP) (CEIP, 2012; United Nations Economic Commission for Europe [UNECE], 2012b)

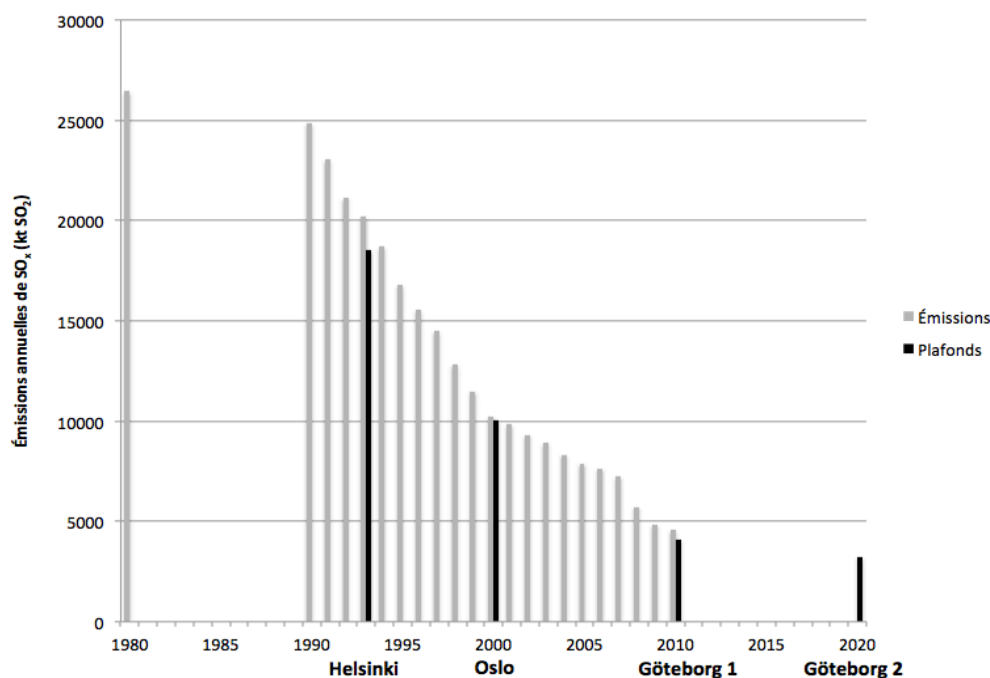


Figure 3-2 : Évolution des émissions de SO<sub>x</sub> et des plafonds fixés par les protocoles entre 1980 et 2020

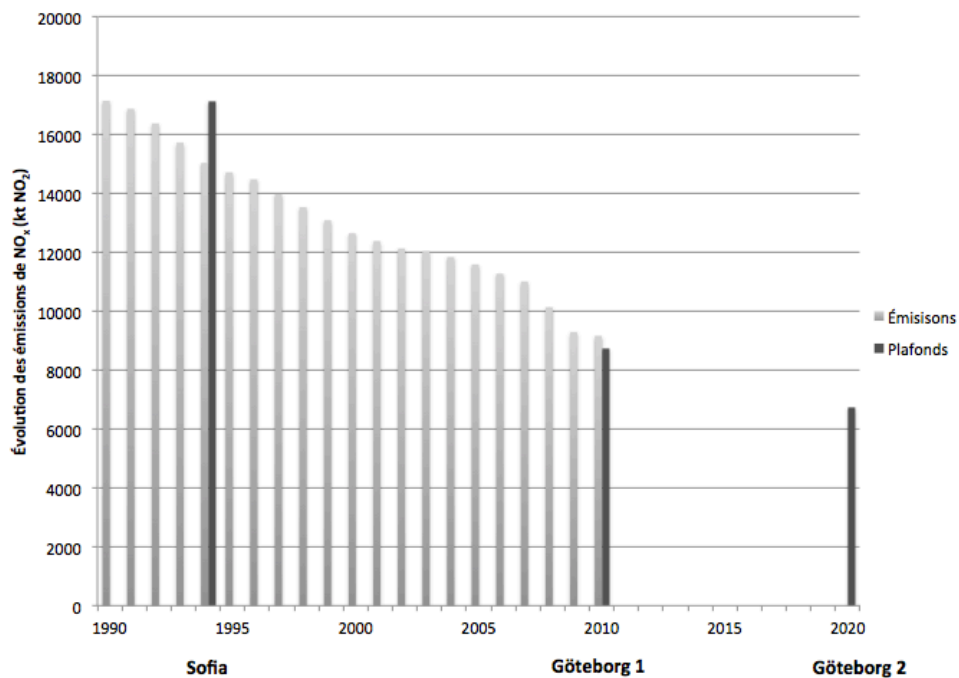


Figure 3-3 : Évolution des émissions de NO<sub>x</sub> et des plafonds fixés par les protocoles entre 1990 et 2020



L'observation de ces graphiques montre que pour ces deux substances les objectifs fixés par les conventions sont atteints ou le sont quasiment. Cette vérification a été effectuée de manière plus générale sur quelques pays pour toutes les substances concernées par le protocole de Göteborg (NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, VOC, NH<sub>3</sub>) par Kelly et al (2010) et les conclusions de cet article indiquent que les plafonds ont tendance à être atteints. Par ailleurs, les plafonds futurs fixés pour 2020 par la révision du protocole de Göteborg (UNECE, 2012a) étant encore plus contraignants que les objectifs actuels, les émissions vont vraisemblablement continuer à diminuer. L'évolution des réglementations environnementales a donc un lien direct avec l'évolution des émissions de polluants.

### **3.1.2 La relation entre politiques environnementales et évolution technologique**

Les émissions d'un processus sont directement reliées à la technologie employée. Une diminution des émissions résulte donc d'optimisations ou de changements technologiques. Pour diminuer les impacts sur l'environnement, deux approches en matière de technologies existent : les « technologies propres » (*clean technology*) ou les « technologies de dépollution » (*clean-up technology*) (Clift, 2006). La première approche consiste à changer de technologie pour passer à une technologie plus propre alors que la seconde vise plutôt à adapter la technologie actuelle en ajoutant par exemple des processus de traitement des émissions en sortie du procédé.

La partie 3.1.1 a montré que l'évolution des émissions coïncidait avec des politiques environnementales. En outre, cette évolution est rendue possible par un changement technologique. Une relation entre politiques environnementales et évolution technologique semble donc fortement plausible mais elle doit être démontrée. Ce rapport a fait l'objet de plusieurs études au cours des dernières années. Par une revue de ces études, Vollebergh (2007) et Jaffe (2002) concluent que les politiques environnementales ont un impact sur les changements technologiques en favorisant l'innovation, l'invention et la diffusion des technologies. En particulier, l'innovation technologique est le meilleur moyen pour atteindre des objectifs environnementaux (Johnstone, Hascic, & Ostertag, 2008). Parmi les politiques environnementales, toutes n'ont pas le même impact sur l'innovation. Des études montrent l'influence positive à la fois de réglementations directes comme des normes d'émissions (Lee,

Veloso, & Hounshell, 2011) mais aussi d'instruments économiques comme par exemple les permis de pollution (Calel & Dechezleprêtre, 2012).

### **3.1.3 Proposition d'une méthodologie pour considérer l'évolution technologique en ACV-P**

Les parties 3.1.1 et 3.1.2 ont montré le lien entre l'évolution technologique et les politiques environnementales. La suite de ce mémoire est donc l'occasion de proposer une méthode novatrice consistant à utiliser des travaux sur le développement des politiques environnementales pour considérer l'influence des changements technologiques sur l'inventaire. Plus particulièrement, les futures réglementations environnementales sont représentées par des objectifs de réduction des émissions, comme ceux fixés par exemple dans les Figures 3-2 et 3-3 par des protocoles internationaux. La méthodologie spécifique pour appliquer cette approche aux données d'inventaire est développée dans le chapitre 6. Elle sous-entend deux hypothèses qui ont été vérifiées dans la partie 3.1.1 et 3.1.2 :

- Les émissions diminuent sous l'influence des objectifs de réduction et ceux-ci sont bien respectés.
- L'évolution technologique est guidée par les politiques environnementales. En particulier, les politiques sont réalistes et les technologies nécessaires pour atteindre les objectifs établis vont bien apparaître et être mises en œuvre.

Le contexte spécifique de la sidérurgie permet d'illustrer de façon plus spécifique cette approche. Le développement ou l'amélioration de technologies ne se fait pas sans incitatif interne ou externe. Dans le cas de la sidérurgie, l'apparition de contraintes comme l'hypothèse d'un marché du carbone pousse ce secteur à prévoir des solutions pour faire face au futur et ne pas se retrouver dépassé par l'apparition de nouvelles politiques environnementales. Le projet ULCOS en est une parfaite illustration. L'émission de gaz à effet de serre, reliée à la problématique du réchauffement climatique, n'est cependant pas le seul aspect ayant un impact sur l'environnement et soumis à des réglementations. Pour lutter contre d'autres problèmes tels que l'acidification des sols et des lacs ou la formation de smog, d'autres politiques environnementales régissent les

émissions de substances à l'origine de ces impacts. Sous l'influence de ces politiques, les différents acteurs de la société doivent s'adapter pour réduire leurs impacts. Par conséquent, le choix et la mise en place de futures politiques vont influencer les industries actuelles et donc leurs émissions. Par le biais de changements technologiques, les données utilisées en inventaire du cycle de vie et associées à ces différentes industries vont donc évoluer dans le futur sous l'influence des nouvelles réglementations. La modélisation de ce facteur dans le cadre du développement d'une méthodologie d'analyse du cycle de vie prospective est donc pertinente.

### **3.2 Mise en place d'une méthodologie d'ACV-P**

Dans la revue de littérature, la principale méthodologie existante identifiée pour la réalisation d'une analyse du cycle de vie prospective est celle développée par Weidema (2003). Elle consiste à identifier dans un premier temps les parties du système concernées par un développement prospectif puis à réaliser ce développement en considérant les détails nécessaires et en choisissant les méthodes prospectives appropriées. La cohérence des différents choix et hypothèses est finalement vérifiée à la fin de l'étude.

La méthodologie proposée dans ce mémoire pour réaliser une analyse du cycle de vie prospective se base sur la méthodologie développée par Weidema et sur des réponses aux lacunes identifiées dans la revue de littérature. Elle se décompose de la manière suivante :

1. Réalisation d'une analyse du cycle de vie initiale visant à cibler les parties du système à considérer dans l'étude prospective;
2. Développement prospectif des parties ciblées dans la première étape, en identifiant la méthode prospective et le niveau de détail pertinents pour chaque aspect prospectif considéré;
3. Prise en compte de l'évolution des données d'inventaire due à l'évolution technologique sous l'influence des futures politiques environnementales;
4. Synthèse des différents aspects prospectifs, vérification de la cohérence et présentation des résultats finaux de l'analyse prospective.

La méthodologie proposée est très similaire à celle développée par Weidema. Les méthodes prospectives utilisables sont les mêmes que celles développées dans le paragraphe 1.2.2. La différence majeure réside dans la troisième étape qui permet de prendre en considération l'influence des changements technologiques via l'utilisation de futures politiques environnementales. Cet aspect prospectif ne s'applique pas seulement à une partie du système, c'est-à-dire à certaines hypothèses de modélisation ou à des données spécifiques, mais concerne toutes les données d'inventaire de l'étude. La quatrième étape de la méthodologie permet de regrouper les différents aspects prospectifs développés et de visualiser leur influence sur l'évolution temporelle des impacts du système étudié.

### **3.3 L'étude de cas appliquée au projet ULCOS**

#### **3.3.1 Objectifs spécifiques à l'étude de cas**

Conformément au deuxième objectif spécifique présenté dans le paragraphe 2.2, une étude de cas est effectuée pour appliquer la méthodologie présentée précédemment au projet ULCOS. Cette étude permet de tester l'applicabilité l'approche dans le contexte spécifique de la sidérurgie et de donner un exemple de l'influence des aspects prospectifs sur les résultats d'une analyse du cycle de vie. Les technologies de production d'acier étudiées sont les filières du projet ULCOS, présentées dans le paragraphe 1.3.3, ainsi que les filières actuelles pour fins de comparaison. Ce développement prospectif vise à prévoir l'évolution des impacts entre les années 2000 et 2050. L'approche utilisée allie plusieurs méthodes utilisées en analyse du cycle de vie prospective : l'application de scénarios, l'extrapolation et la modélisation.

L'application de la méthodologie prospective à l'étude de cas permet de remplir les objectifs suivants, qui correspondent aux souhaits du partenaire industriel :

- comparaison des impacts associés aux technologies de production d'acier à l'étude en utilisant des données actuelles
- comparaison des impacts associés aux technologies de production d'acier à l'horizon 2050 en utilisant une méthodologie prospective

- étude des impacts associés à l'industrie sidérurgique dans sa globalité, c'est-à-dire en considérant les variations temporelles de la production d'acier et de la part de chaque technologie dans la production totale

### **3.3.2 Présentation des données prospectives issues du projet ULCOS.**

Avant de passer à la présentation des résultats de l'application de la méthodologie d'ACV-P, les études prospectives menées dans le cadre du projet ULCOS sont présentées dans cette partie. Les données issues de ces études sont utilisées tout au long de l'étude de cas pour développer l'analyse prospective.

Dans le cadre du programme ULCOS, des études prospectives ont été menées pour modéliser l'influence de futures contraintes en terme d'émissions de gaz à effet serre sur l'industrie sidérurgique (Bellevrat & Menanteau, 2008). Parmi les résultats de celles-ci, les évolutions du mix électrique, de la production d'acier ainsi que l'implantation des nouvelles technologies ont été modélisées sur l'intervalle de temps étudié (2000-2050). Ces études se basent sur le modèle d'équilibre partiel POLES (LEPII, 2006) et considèrent plusieurs scénarios relatifs à différents objectifs de concentrations de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Aucune modélisation n'est effectuée dans le cadre de ce mémoire; les données utilisées provenant de ces études menées au préalable par d'autres membres du projet ULCOS. Le choix du modèle d'équilibre et la mise en place des scénarios ont donc été effectués indépendamment de ce mémoire. Bellevrat et Menanteau, auteurs de ces études prospectives, les détaillent plus précisément dans leur article (Bellevrat & Menanteau, 2008). Pour notre analyse prospective, seuls deux scénarios seront considérés : un scénario de référence et un scénario alternatif.

Le scénario de référence se base sur les tendances économiques et technologiques actuelles. Par conséquent, il équivaut à un faible coût relatif aux émissions de CO<sub>2</sub> et conduit dans les simulations à une augmentation à l'échelle mondiale de celles-ci d'un facteur 2,5 entre 2000 et 2050. Il représente une vision dite « business as usual », c'est-à-dire le cas où aucune intervention n'a lieu dans le futur pour contrecarrer le problème du changement climatique.

Le scénario alternatif se base sur une diminution des émissions de GES à l'échelle européenne d'un facteur 4 en 2050, avec des objectifs différents selon les secteurs d'activité.

Pour le reste du monde, l'évolution conduirait à une diminution des émissions globales de 50% par rapport à 1990, ce qui correspond à l'objectif fixé lors du Sommet de Copenhague en 2009. Les facteurs sont choisis dans ce scénario avec l'objectif d'atteindre une concentration à long terme en GES dans l'atmosphère de 450 ppm de CO<sub>2</sub>eq.

Le modèle POLES utilisé pour les modélisations est un modèle d'équilibre partiel conçu pour représenter le système énergétique mondial et qui permet de simuler l'influence de politiques climatiques ou technologiques (LEPII, 2006). Les échanges énergétiques sont modélisés à partir de la décomposition du monde en plusieurs régions et de l'économie en secteurs d'activité. Pour représenter plus spécifiquement le cas de l'industrie sidérurgique et les nouvelles technologies à venir, un module spécifique a été développé et ajouté au modèle général (Bellevrat & Menanteau, 2008). Les données prospectives utilisées dans l'étude comportent donc un aspect conséquentiel. Le modèle d'équilibre partiel POLES associé au module spécifique à la sidérurgie permet de modéliser les impacts de l'introduction des nouvelles technologies dans le marché européen, en particulier pour les échanges énergétiques.

Ces simulations ont permis d'obtenir pour les deux scénarios étudiés des projections de la production européenne d'acier et de la part de chaque technologie (traditionnelles ou nouvelles) dans la production totale. Ces données seront utilisées dans la suite de l'analyse et sont en partie présentées dans les Figures 3-4 et 3-5.

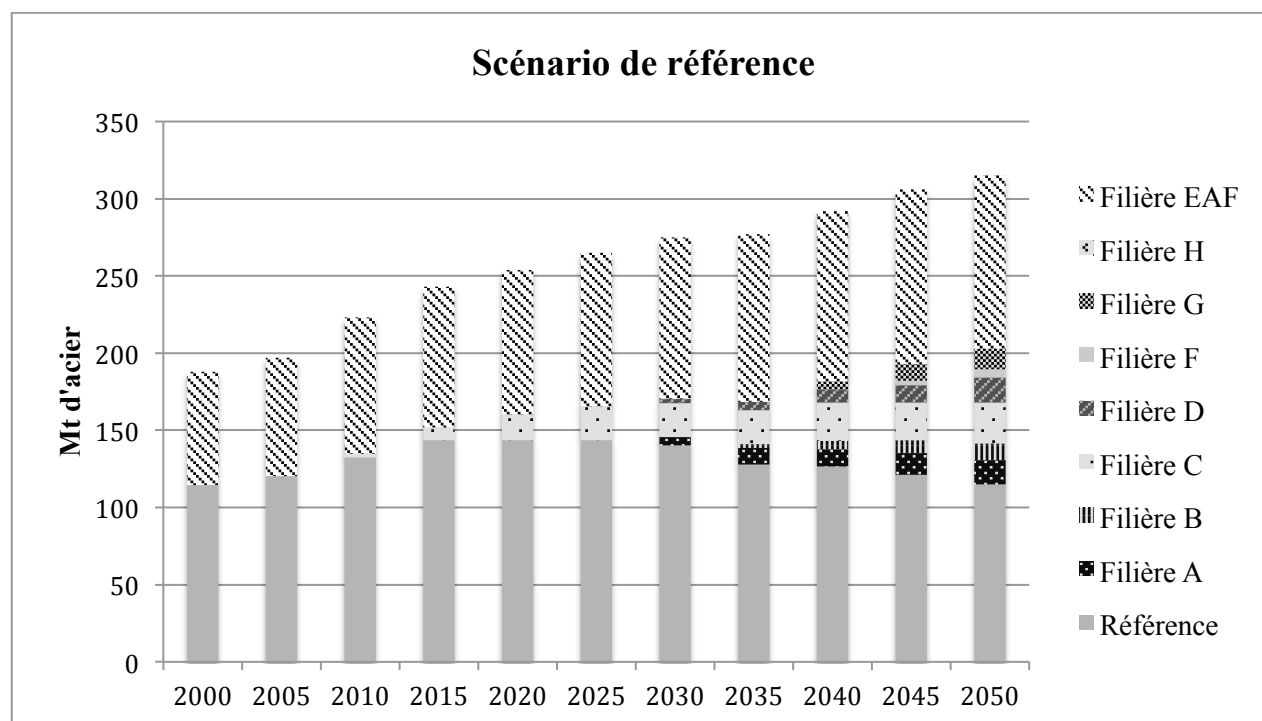


Figure 3-4 : Évolutions de la production d'acier entre les années 2000 et 2050  
pour le scénario de référence

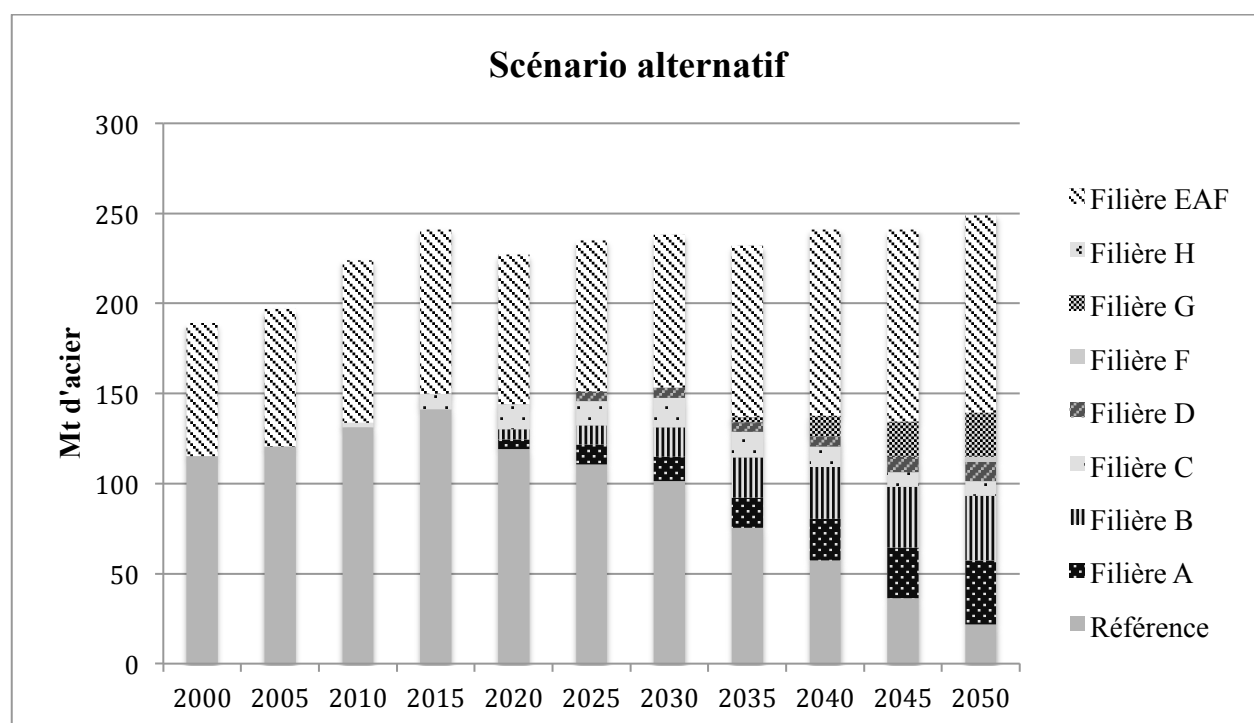


Figure 3-5 : Évolutions de la production d'acier entre les années 2000 et 2050  
pour le scénario alternatif

Ces graphiques montrent que les nouvelles filières étudiées dans ce projet ne vont pas être introduites tout de suite, mais qu'elles doivent d'abord arriver à maturité avant d'être implémentées. Dans le scénario de référence, elles apparaissent assez lentement et représentent en 2050 moins d'un tiers de la production totale. Par contre, dans le scénario alternatif, une plus grande part est faite à ces nouvelles technologies et à la voie secondaire. Par ailleurs, dans le scénario alternatif, la production d'acier évolue plus lentement que dans le scénario de référence. Cette observation s'explique par le fait que la plus forte contrainte en terme d'émissions de GES conduit à une diminution des activités globales et à choisir d'autres matériaux ayant une plus faible empreinte carbone.

Ces deux scénarios et les données leur étant associées sont utilisés dans la suite de l'étude pour réaliser l'analyse du cycle de vie prospective des technologies de production d'acier à l'étude. Ces scénarios permettent de représenter deux visions du futur, une première « *business as usual* » et une seconde plus stricte en matière de gaz à effet de serre, qui seront comparées dans la suite de l'étude. Les résultats des modélisations effectuées pour ces deux scénarios sont utilisés comme base pour l'analyse prospective. Dans un premier temps, les données prospectives concernant la variation du mix électrique servent à étudier l'influence de cette évolution sur les résultats. Les données sur la variation de la production totale d'acier sont ensuite en partie utilisées pour modéliser l'impact des réglementations environnementales sur les résultats. Finalement, les informations sur la prévision de la part de chaque technologie dans la production totale permettent de calculer l'évolution prospective des impacts associés à l'industrie sidérurgique dans son ensemble.

### **3.4 Bilan de l'application de la méthodologie d'ACV-P à l'étude de cas**

Les étapes nécessaires à l'utilisation de la méthodologie proposée sur l'étude de cas de ce mémoire sont résumées dans la figure 3.6. L'application de ces quatre étapes est présentée dans les chapitres 4 à 7.



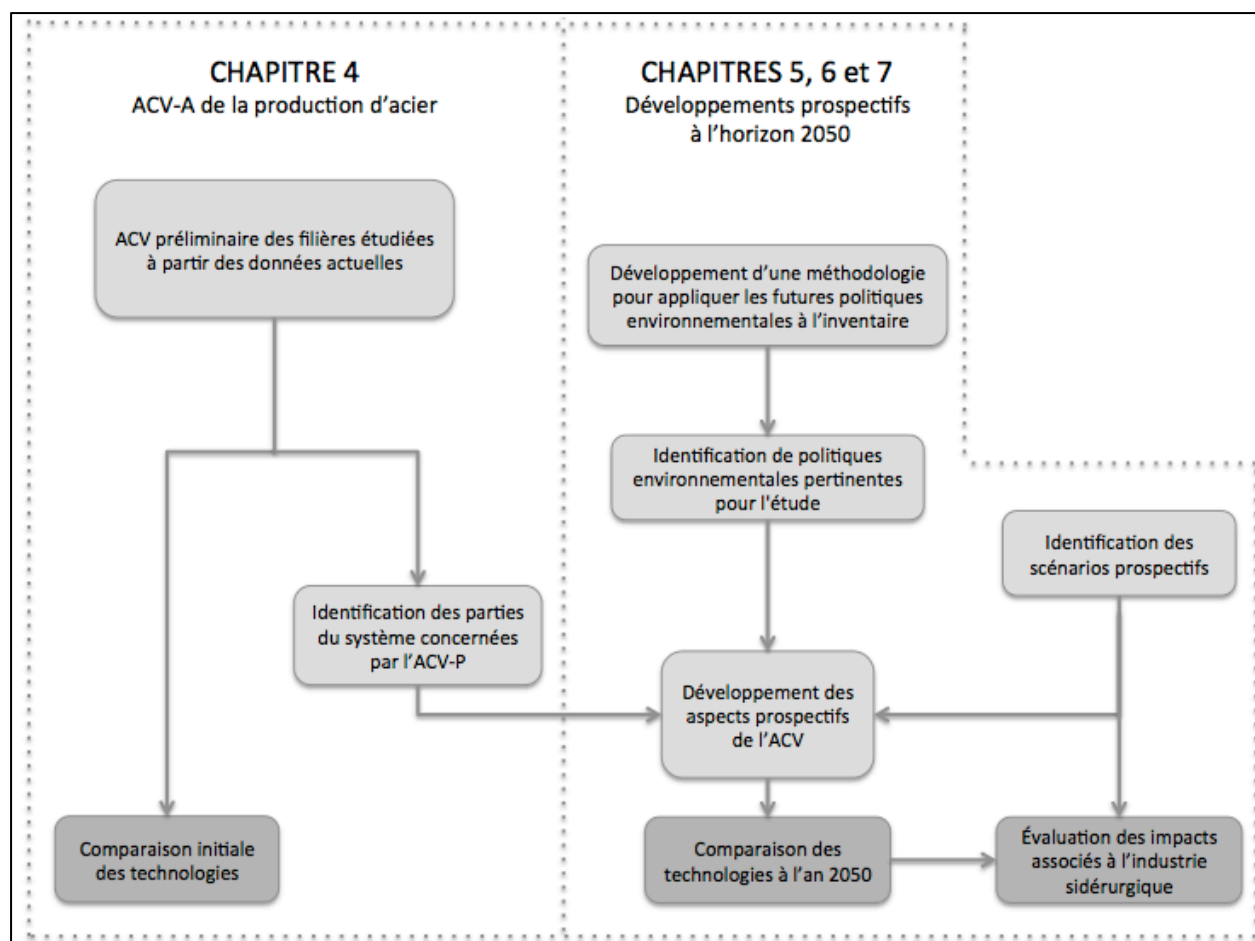


Figure 3-6 : Application de la méthodologie d'ACV-P à l'étude de cas

Pour établir l'analyse du cycle de vie attributionnelle initiale, le chapitre 4 présente les objectifs et champ de l'étude de cette ACV. La collecte des données, les résultats et l'interprétation de cette étude initiale sont ensuite détaillés. Les développements prospectifs des parties du système ciblées comme déterminantes sont développés dans le chapitre 5. Une méthodologie novatrice est ensuite proposée et appliquée dans le chapitre 6 pour tenir compte de l'effet des politiques environnementales. Finalement, ces résultats prospectifs sont synthétisés et utilisés dans le chapitre 7 pour visualiser l'évolution des impacts associés à la production moyenne d'acier, en tenant compte de la contribution de chaque technologie à la production globale.

## **CHAPITRE 4     ACV ATTRIBUTIONNELLE DE LA PRODUCTION D'ACIER**

Ce chapitre présente l'analyse du cycle de vie initiale effectuée sur différentes technologies de production d'acier. Les objectifs et le champ de l'étude sont initialement présentés, puis la collecte des données d'inventaire et l'évaluation des impacts sont détaillées. Les résultats de cette analyse initiale sont finalement interprétés pour en tirer les enseignements utiles pour l'étude prospective menée dans le prochain chapitre.

### **4.1 Objectifs et champ de l'étude de l'ACV**

#### **4.1.1 Objectifs**

L'étude développée dans ce mémoire est basée sur l'objectif suivant : réaliser une analyse du cycle de vie prospective de différentes technologies de production d'acier et en comparer les performances environnementales.

L'analyse du cycle de vie effectuée se base sur la méthode attributionnelle, le but étant de comparer différentes technologies en développement. Les conséquences de l'implantation des ces nouvelles technologies ne sont pas prises en compte dans cette étude. Elles seront néanmoins discutées dans le chapitre 8 lors de l'analyse critique des résultats.

Différents procédés de production d'acier sont testés dans cette étude. L'analyse portera sur des voies actuelles et sur des technologies développées dans le cadre du projet ULCOS :

- le haut fourneau (filière de référence),
- la réduction directe traditionnelle,
- le nouveau procédé de réduction directe,
- le haut fourneau avec utilisation de biomasse,
- le haut fourneau avec recyclage des gaz au sommet,
- la filière par fusion-réduction,
- l'électrolyse du minerai de fer par voie aqueuse,

- la pyro-électrolyse de minerai de fer,
- l'arc électrique (filière EAF).

#### 4.1.2 Fonction, unité fonctionnelle et flux de référence

La fonction étudiée est la production de bobines laminées à chaud (*Hot Rolled Coil*, HRC) à la porte de l'usine. Certains procédés possèdent des produits secondaires comme de l'électricité, des laitiers ou des goudrons dont l'étude devra tenir compte.

L'unité fonctionnelle qui découle de la fonction choisie est la production d'une tonne de HRC, sur un site européen dont la production annuelle est de 4 Mt de HRC. Le flux de référence associé à cette unité fonctionnelle est alors une tonne de HRC.

#### 4.1.3 Frontières du système

L'analyse du cycle de vie réalisée est dite « du berceau à la barrière ». Elle englobe toutes les étapes entre l'extraction des matières premières et le produit fini à la sortie de l'usine, mais son utilisation et sa fin de vie ne sont pas considérées. La Figure 4-1 illustre les frontières du système à l'étude.

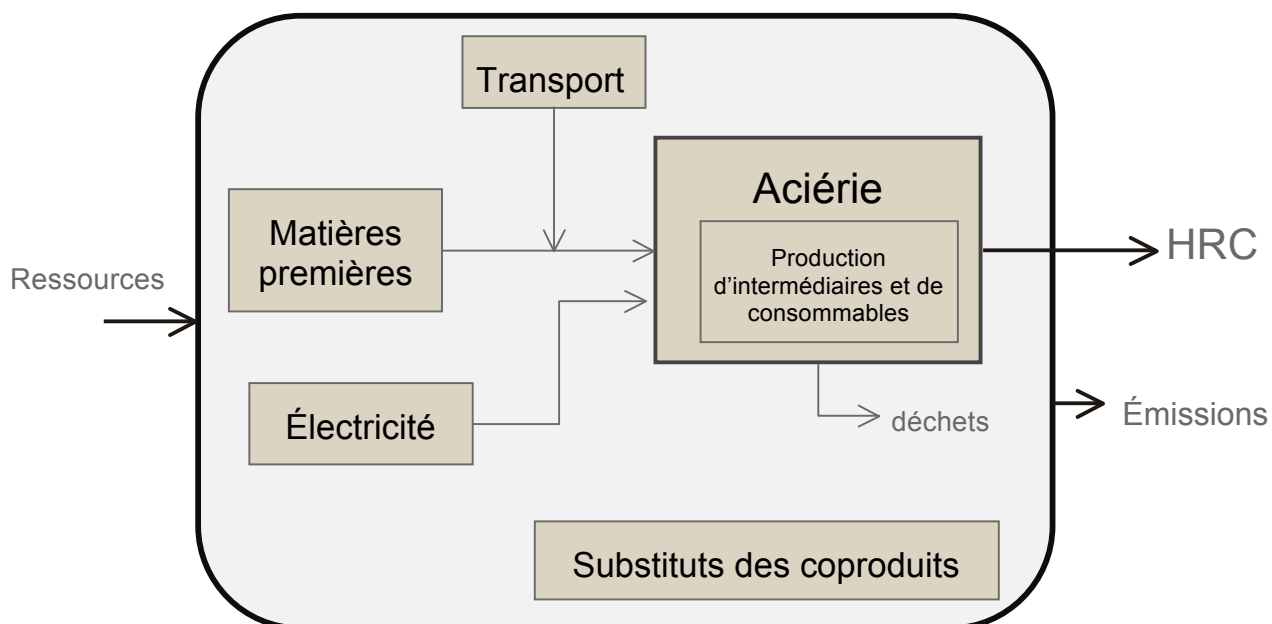


Figure 4-1: Frontières du système à l'étude

En amont de l'aciérie, l'étude inclut l'extraction des matières premières, leur transport et la production d'électricité. Le site (l'aciérie) est considéré comme une usine intégrée modèle : dès que possible, toutes les unités de production d'intermédiaires et de consommables ont lieu sur place. C'est, par exemple, le cas pour la production de chaux ou la séparation et la compression de l'air utilisé par les procédés. La mise en décharge des déchets de production est considérée à l'intérieur du système, ainsi que le crédit induit par la valorisation des coproduits (méthode de l'expansion des frontières). Ces hypothèses permettent de garantir l'équivalence fonctionnelle entre les filières à l'étude. Les seuls entrants dans le système sont les ressources provenant de l'écosphère et les sortants sont les émissions et le flux de référence.

L'usine modélisée pour l'étude est une usine idéale. Tous les coproduits sont utilisés si possible sur le site. Par exemple, tous les gaz de procédés sont réutilisés dans les différentes unités et, en cas d'excès, de l'électricité est fabriquée à partir de ces gaz. De plus, si une filière ne permet pas de traiter les ferrailles internes, un four à arc électrique a été ajouté à la modélisation du site pour les considérer. Cette réduction des pertes au maximum possible (certains déchets ne sont toutefois pas exploitables) ne serait pas forcément réaliste sur un site de production. Dans le cas réel, des facteurs économiques et d'investissement sont aussi à prendre en compte.

#### **4.1.4 Sources de données**

Les données utilisées pour l'étude proviennent de plusieurs sources :

- Des bases de données génériques (ecoinvent 2.0),
- Des données industrielles générales (par l'intermédiaire de la base de données de la World Steel Association),
- Des données industrielles spécifiques (calculs et bilans de masse à partir de la littérature ou de données de laboratoire).

#### **4.1.5 Frontières géographiques et horizon temporel**

Géographiquement, l'étude se base sur une usine située en Europe de l'Ouest. Par conséquent, les données utilisées et les distances de transport calculées sont choisies pour concorder avec cette hypothèse.

Une grande partie des données sont issues de la version 2.0 de la base de donnéesecoinvent qui date de 2007. Cependant, les données présentes dans cette base proviennent principalement de littératures qui peuvent s'étaler sur une plage de temps beaucoup plus ancienne. Les données provenant de la World Steel Association ont été relevées entre les années 2000 et 2005.

D'un point de vue pratique, l'analyse de cycle de vie initiale est considérée comme étant réalisée à l'année 2000. Par la suite, le développement prospectif de l'inventaire est conduit pour représenter les émissions envisagées jusqu'à l'an 2050.

#### **4.1.6 Confidentialité des données**

Les filières développées dans le cadre du projet ULCOS sont novatrices et font l'objet de travaux en recherche et développement assez importants. Des efforts seront faits pour assurer la confidentialité des données industrielles utilisées. En particulier, le nom des filières ne sera pas directement utilisé pour la présentation des résultats, mais elles seront renommées « filière A » à « filière G ». La filière définie comme référence pour cette étude correspond à la fabrication d'acier via le haut fourneau traditionnel. La filière par four à arc électrique (filière EAF) est aussi présentée pour comparer les impacts de la production d'acier par voie primaire et par voie secondaire.

### **4.2 Collecte des données pour l'inventaire du cycle de vie**

La collecte des données d'inventaire a été effectuée séparément pour les différentes étapes du cycle de vie considérées dans les frontières de l'étude. La phase la plus problématique, détaillée dans la partie 4.2.1, a été la modélisation des neuf technologies étudiées et la récolte de données liées aux émissions sur les sites. Pour les étapes autres que l'aciérie présentée dans la Figure 3-1, les données proviennent de simples calculs et de bases données. Les hypothèses posées sont présentées dans les parties 4.2.2 à 4.2.4.

#### **4.2.1 Données technologiques pour les sites de production d'acier**

La modélisation du site de production repose sur celle effectuée avec le « CO2 tool », qui est un calculateur développé dans le cadre du projet ULCOS (Birat, Lorrain, & de Lassat, 2008).

Cet outil permet de modéliser, pour chaque filière à l'étude, les entrants et sortants d'un site de production d'acier produisant en moyenne quatre millions de tonnes d'acier par an. Ce sont ces valeurs d'entrants et sortants qui ont été utilisées pour quantifier les matières premières nécessaires, les déchets et les coproduits et qui ont été mises à l'échelle pour correspondre au flux de référence.

L'outil utilisé décompose le site en ses différentes unités (cokerie, pelletisation, agglomération, four, métallurgie secondaire, fabrication de chaux, production d'électricité ou de vapeur sur site, ...) et représente les échanges entre ces unités. La Figure 4-2 présente un exemple de décomposition de l'aciérie en unités pour la filière traditionnelle par haut fourneau. Pour chaque unité, des données d'inventaire ont été recueillies par l'intermédiaire de la base de données de la World Steel Association (2010) ou de celle d'ecoinvent (Frischknecht & Rebitzer, 2005). En recoupant les informations issues des bases de données et celles de l'outil utilisé, il est possible de choisir les données les plus représentatives pour la filière étudiée. Par exemple, certaines cokeries utilisent du gaz naturel pour se fournir en énergie alors que d'autres recyclent plutôt des gaz de haut fourneau. Le choix d'une option ou d'une autre conduit à des émissions différentes pour cette unité. Il est donc important de sélectionner pour chaque filière et chaque unité les données les plus proches de celles modélisées dans l'outil.

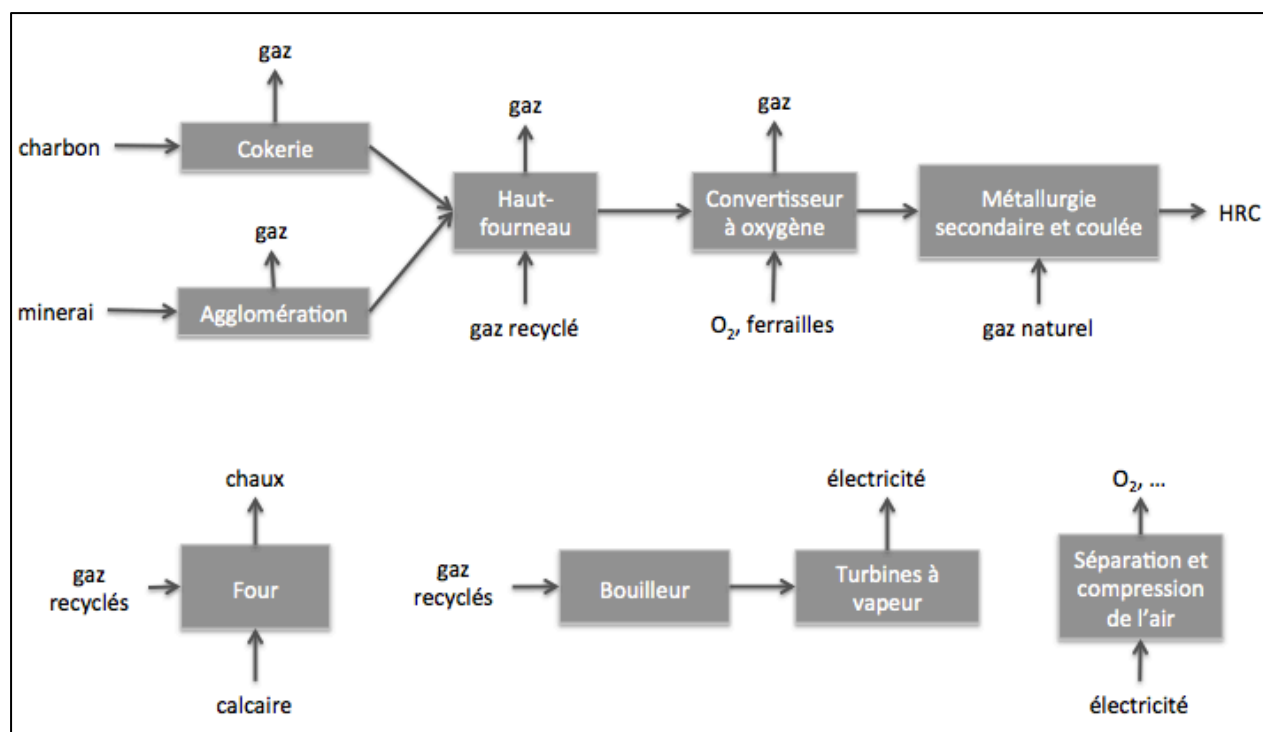


Figure 4-2 : Schéma général du site pour la filière de référence

Dans la plupart des cas, les données existantes suffisent pour représenter les unités considérées. Cependant, pour certaines filières innovantes, quelques unités n'existent pas encore à l'échelle industrielle, comme par exemple les procédés d'électrolyse de minerai de fer ou certains de fusion-réduction. Pour obtenir des données sur ces unités, plusieurs méthodes inspirées de celles proposées en analyse du cycle de vie prospective ont été identifiées :

- Méthode participative : l'avis des chercheurs travaillant au développement de ces technologies a été demandé pour cibler les principaux risques de pollutions. Ces acteurs sont ceux qui ont le plus de connaissances sur ces technologies et sont donc les plus aptes à répondre et à fournir des informations précises.
- Extrapolation de données existantes : dans les nouvelles filières, certaines unités sont très semblables à celles des filières actuelles mais certains paramètres de fonctionnement sont modifiés. Par exemple, un changement dans la composition des réactifs peut nécessiter d'allonger le temps d'une des opérations unitaires. Pour refléter ce changement sur les émissions associées à cette unité, une relation proportionnelle entre le temps d'utilisation

et les émissions est supposée pour extrapoler des données actuelles aux nouvelles conditions d'opération.

- Calculs simplifiés : une autre méthode pour évaluer les émissions de ces unités manquantes consiste à se baser sur les normes en vigueur en sidérurgie et à considérer que les nouvelles installations vont être conformes à ces normes. Les normes représentant des émissions par volume de gaz en sortie du procédé et l'utilisation des simulations numériques de ces procédés permettent de calculer les émissions pour l'inventaire. Dans la pratique, les émissions ne dépasseront pas les normes mais peuvent souvent être inférieures. Elles peuvent donc être en partie surestimées dans cette méthode, mais il est préférable d'agir dans ce sens à ce stade plutôt que d'ignorer totalement les émissions possibles.

Ces trois méthodes ont été employées pour modéliser les émissions associées à quelques unités présentes dans cette étude. La confidentialité de certaines données associées aux nouvelles technologies de ULCOS empêche de fournir un exemple précis, mais le cas suivant illustre leur application sur un exemple utilisant des données fictives et présenté dans la Figure 4-3.

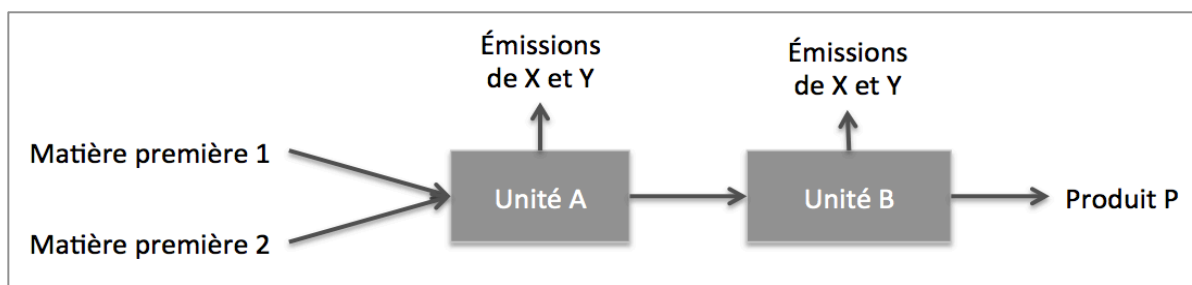


Figure 4-3 : Exemple pour la modélisation des unités manquantes

Cette figure illustre, pour une filière innovante mais fictive, le cas de deux unités émettant théoriquement les substances X et Y. Pour l'unité A, la discussion avec un chercheur participant au développement de cette technologie nous apprend que cette unité est très semblable à une unité A' existant actuellement. Un changement dans les matières premières va cependant conduire à une diminution de 30% du temps d'opération. De plus, une étude de cette unité montre que ses émissions sont principalement dues aux combustibles qu'elle utilise pour chauffer les réactifs. Par extrapolation des données existantes, celles estimées pour l'unité A peuvent donc



être calculées en diminuant simplement de 30% les émissions de X et Y répertoriées actuellement pour l'unité A'.

De plus, l'unité B est totalement novatrice et va remplacer une unité C utilisée dans les filières actuelles. L'utilisation de calculs simplifiés basés sur les normes actuelles pour l'unité C (3 mg de X/Nm<sup>3</sup> et 0,4 g de Y/Nm<sup>3</sup> de gaz de procédé) est une solution pour fournir des données liées à cette nouvelle unité. L'unité B produisant 950 Nm<sup>3</sup> de gaz de procédé par tonne de produit P, les émissions associées à cette unité sont alors 2,85 g de X (0,003\*950) et 380 g de Y (0,4\*950) par tonne de produit P. Cet exemple montre l'interaction entre la méthode participative qui permet d'obtenir l'avis d'experts sur les technologies étudiées et les méthodes calculatoires permettant d'obtenir des estimations numériques des données d'émissions.

#### **4.2.2 Données en amont du site de production**

Les données d'inventaire pour les matières premières (charbon, minerais, ...) et l'électricité proviennent de la base de données ecoinvent. Cette base de données a été choisie car elle représente des données européennes et elle est complète et transparente. Le mix électrique utilisé pour cette étude initiale se base sur une moyenne à l'échelle européenne pour l'année 2000, dont la composition est présentée dans la Figure 5-1.

Pour les données associées à la ferraille utilisées en grande quantité dans la filière par four à arc électrique mais aussi en faible quantité dans les autres filières, une méthode d'imputation par *cut-off* a été appliquée. Seules les données d'inventaire associées à la récupération des ferrailles ont été prises en compte et non celles associées à la production et à l'utilisation de l'acier situé en amont du cycle de vie de ces ferrailles. Ce choix attribue la responsabilité du recyclage à l'étude effectuée mais celle de la fabrication du matériau est attribuée à son utilisateur. Il permet de représenter les ferrailles comme une ressource disponible en grande quantité dans l'environnement et dont la réutilisation doit être favorisée.

#### **4.2.3 Modélisation du transport**

Les données pour le calcul des émissions dues au transport des matières premières sont issues de la base de données ecoinvent. Les hypothèses pour les moyens et distances de transport des différents matériaux sont formulées à partir de données sur la répartition de leur production mondiale.

Certains des processus de la base de données de ecoinvent intègrent le transport des matériaux jusqu'à un lieu de stockage en Europe alors que d'autres s'arrêtent au lieu d'extraction, les origines et distances calculées varient grandement selon les matériaux. Toutes ces distances sont calculées en considérant que le lieu de production est situé en Europe de l'Ouest. Quelques exemples d'hypothèses posées sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 4-1 : Exemple d'hypothèses pour le transport des matières premières

<b>Matière première</b>	<b>Transport</b>	<b>Moyen de transport</b>	<b>Distance (km)</b>
Charbon	Du stockage régional européen à l'aciérie	Train	400
Dolomite	De la mine locale à l'aciérie	Camion	300
Gaz naturel	Processus directement jusqu'à l'aciérie	/	0
Olivine	De la mine dans le nord de l'Europe à l'aciérie	Train	1050
		Bateau	700

Pour le transport du charbon, par exemple, les données utilisées incluent le transport des mines à un lieu de stockage régional situé en Europe. La part de chaque région du monde dans l'approvisionnement européen en charbon est considérée dans les données. L'hypothèse pour le transport de cette matière première a donc seulement été posée pour modéliser le transport du charbon entre ce lieu de stockage et l'aciérie.

À l'inverse, pour évaluer les distances de transport associées aux minerais de fer, des calculs plus détaillés ont été faits. Sur le modèle de l'étude effectuée dans la base de données ecoinvent (Classen et al., 2007), la part de chaque continent dans l'approvisionnement européen en minerai de fer a été calculée grâce à une étude de la production et de la consommation mondiale. Ces deux paramètres sont relevés par continent puis les échanges entre régions importatrices et exportatrices sont pris en compte. Le Tableau 3-2 regroupe les données pour l'année 2000, selon le U.S. Geological Survey (USGS) (Jorgenson, Tolcin, & Roberts, 2004) et la World Steel Association (WSA) (World Steel Association, 2011). Cette dernière source fournit la production de fonte dans chaque région, qui est ensuite utilisée pour déterminer la quantité de minerai de fer consommé. Les calculs effectués sont expliqués par la suite.

Tableau 4-2 : Répartition géographique de la production et de la consommation de minerai de fer

Année 2000	Production de minerai de fer	Production de fonte	Minerai de fer consommé	Importation	Exportation	Sources des exportations
	(M tonnes)	(M tonnes)	(M tonnes)	(M tonnes)	(M tonnes)	%
Source des données	USGS	WSA	calculs	calculs	calculs	
Europe de l'Ouest	21	118	215	194		
Europe de l'Est	159	74	135		24	7%
Asie	319	273	497	178		
Afrique	56	9	16		40	11%
Amérique du Nord	113	62	113		0	0%
Amérique du Sud	195	32	58		137	37%
Océanie	185	8	15		170	46%
Total	1048	576	1048	371	371	

En se basant sur l'hypothèse que la quasi-totalité du minerai de fer est utilisée pour la production de fonte (Jorgenson, Tolcin, & Roberts, 2002) et de préférence dans la région où il est extrait, le minerai de fer consommé dans chaque région est calculé en multipliant la quantité totale de minerai extrait dans l'année au pourcentage de fonte produite dans la région donnée. La différence entre la consommation et la production de minerai donne les importations ou exportations des différentes régions. Un simple rapport permet ensuite de calculer la contribution de chaque région à la quantité totale de minerai exportée. En conclusion de cette étude, pour l'année 2000, l'Asie et l'Europe de l'Ouest sont importatrices de minerais, l'Amérique du Nord est autosuffisante et les autres régions exportatrices.

Pour notre analyse, la région considérée est l'Europe de l'Ouest. Les résultats de l'étude montrent que 10% (21 Mt sur 215 Mt nécessaires) du minerai est extrait sur place et que les 90% restants sont importés. La composition de ces importations est supposée égale à celle de la colonne « sources des exportations ». Les hypothèses pour le transport du minerai de fer sont donc posées à partir de ces résultats et présentées dans le Tableau 4-3. Le pourcentage de chaque région est calculé en multipliant la part de minerai importée par la contribution de cette région aux exportations mondiales, telle que présentée dans la dernière colonne du Tableau 4-2. Par exemple, l'Océanie représente 46% des exportations mondiales de minerai. Comme 90% du

minéral européen est importé d'une autre région du monde, c'est donc 41% ( $46 \times 90 = 41$ ) du minéral utilisé dans l'aciérie qui provient d'Océanie.

Tableau 4-3 : Transport du minéral de fer

Lieu de production	Pourcentage	Mode de transport	Distance (km)
Océanie	$90\% \times 46\% = 41\%$	Train	1000
		Bateau	15500
		Barge	170
Amérique du Sud	$90\% \times 37\% = 33\%$	Train	1000
		Bateau	8600
		Barge	170
Afrique	$90\% \times 11\% = 10\%$	Train	1000
		Bateau	6000
		Barge	170
Europe de l'Est	$90\% \times 7\% = 6\%$	Train	2500
Europe de l'Ouest	10%	Train	500

À partir de cette répartition, la distance totale pour chaque mode de transport peut être calculée.

Tableau 4-4 : Distances de transport pour le minéral de fer

Mode de transport	Distance totale (km)
Train	945
Bateau	9361
Barge	133

Associées à la masse de minéral de fer consommée dans chaque filière, ces distances permettent de calculer les émissions dues au transport de ce composé.

#### 4.2.4 Gestion des coproduits et des déchets

Le processus de fabrication d'acier produit un certain nombre de déchets et/ou de coproduits. Afin de déterminer si ces sous-produits sont valorisés et de quelles manières ou s'ils sont mis en décharge, l'avis d'un expert a été considéré. Des processus issus de la base de donnéesecoinvent ont été appliqués pour calculer l'inventaire associé à cet aspect.

Pour la considération des coproduits, la norme ISO 14044 (ISO, 2006a) recommande d'éviter l'allocation. Par conséquent, la méthode de l'expansion des frontières a été choisie, ce qui est aussi en accord avec la méthodologie proposée par la World Steel Association.

L'inventaire de la production des coproduits par une méthode de production traditionnelle est soustrait à l'inventaire total de la production d'acier. L'identification des coproduits et de la production évitée a été effectuée avec l'aide d'un expert ayant une très grande connaissance de la sidérurgie et ayant l'habitude de traiter ce problème en ACV. Des exemples d'hypothèses posées pour l'utilisation de ces coproduits sont résumés dans le Tableau 4-5.

Tableau 4-5 : Exemples de coproduits présents sur le site

Coproduit	Production évitée
Goudron	Production de bitume
Gypse	Extraction de gypse
Laitier de convertisseur	Agrégat pour route
Laitier de haut fourneau granulé	Production de clinker

## 4.3 Outils de modélisation et évaluation des impacts

### 4.3.1 Évaluation des impacts du cycle de vie

La méthode d'évaluation des impacts utilisée pour cette étude est la méthode CML (version CML 2001), développée par l'université de Leiden aux Pays-Bas (CML, 2012). Cette méthode a été choisie car l'industriel partenaire du projet l'utilisant déjà, cela a facilité la transmission des résultats et leur compréhension. Les catégories considérées regroupent les principaux impacts historiquement associés à la production d'acier et sont brièvement présentées par la suite. Des impacts comme, par exemple, la toxicité ont été omis dans cette étude par manque de données sur les émissions leur étant associées.

- Acidification (*Acidification Potential*)

Cette catégorie reflète l'augmentation de la concentration en ions hydrogènes dans l'eau et le sol. Ces impacts sont générés par la déposition atmosphérique de substances acidifiantes volatiles qui sont principalement les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>), le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) et l'ammoniac (NH<sub>3</sub>).

- Eutrophisation (*Eutrophication Potential*)

Elle considère les impacts sur les écosystèmes terrestre et aquatique des nutriments azote et phosphore dans leurs formes biodisponibles. L'eutrophisation terrestre est majoritairement causée par la déposition d'azote issu de l'ammoniac (agriculture) ou d'oxydes d'azote (procédés de combustion). L'augmentation des nutriments contenus dans le sol peut changer la composition de la végétation en favorisant certaines espèces au détriment d'autres. L'eutrophisation aquatique est plutôt causée par les émissions de phosphates, de nitrates et d'autres composés contenant de l'azote ou du phosphore. Cette augmentation en nutriments favorise la croissance d'algues, ce qui conduit, entre autres, à un appauvrissement en oxygène dans l'eau et à un assombrissement (ces composés bloquant la lumière du soleil en surface).

- Changement climatique (*Global Warming Potential, GWP 100 years*)

Cet impact est causé par l'émission de gaz à effet de serre (GES). Ces substances contribuent au forçage radiatif, c'est-à-dire qu'elles absorbent les radiations infrarouges de la terre et contribuent donc à son réchauffement. Pour chaque substance, le forçage radiatif est déterminé en prenant en compte le temps de résidence de celle-ci dans l'atmosphère. Pour le cas spécifique du carbone biogénique, le facteur de caractérisation dans la méthode considérée est nul.

- Création d'ozone photochimique (*Photochemical Ozone Creation Potential*)

La formation d'ozone photochimique résulte de mécanismes complexes faisant intervenir à la fois des composés organiques volatils (COV) et des oxydes d'azote. Cet ozone ou d'autres composés réactifs issus de ces mécanismes sont nocifs pour l'être humain lorsqu'ils sont respirés et peuvent endommager la végétation ou oxyder des matériaux.

- Utilisation des ressources non biotiques (*Abiotic Depletion Potential*)

Cet indicateur illustre l'épuisement des ressources. Il est défini par la diminution de la disponibilité des ressources due à une utilisation supérieure à leur taux de remplacement. Cette catégorie considère les ressources abiotiques comme les métaux ou les combustibles fossiles qui sont contenus en quantité limitée sur la Terre.

### **4.3.2 Outils de modélisation**

Initialement, l'inventaire des émissions associées au site (tel que défini dans le paragraphe 4.2.1) a été effectué avec Excel. Cette première étape a permis de faciliter le regroupement de données provenant des diverses sources. Pour réaliser les analyses du cycle de vie, le logiciel OpenLCA (GreenDeltaTC GmbH, 2011) a ensuite été utilisé. Ce logiciel, gratuit et open-source, a été choisi pour permettre une réutilisation facile des résultats par une tierce personne. Les bases de données utilisées ont été importées dans le logiciel car il ne contient initialement aucune donnée. Pour introduire les données du site calculées avec Excel, de nouveaux processus ont été créés dans la base de données du logiciel.

Après une première modélisation de l'inventaire et des impacts associés avec OpenLCA, les résultats ont été extraits et utilisés dans Excel. Ce changement était nécessaire pour pouvoir étudier l'influence du temps sur les inventaires de chaque technologie, tel que présenté dans les chapitres 5 à 7. La paramétrisation des données est en effet difficilement réalisable dans le logiciel utilisé mais beaucoup plus facile avec Excel.

## **4.4 Interprétation des résultats de l'ACV initiale**

Suite à la collecte des données et la modélisation des données de l'inventaire dans le logiciel, la méthode d'EICV choisie a été appliquée à l'étude et les résultats obtenus sont présentés dans cette partie. Une comparaison des technologies étudiées est d'abord effectuée puis une analyse de contribution est menée pour identifier l'origine des impacts observés. Finalement, les conclusions de cette étude initiale sont formulées pour passer à l'analyse prospective.

### **4.4.1 Comparaison initiale des technologies**

Les résultats de cette étude initiale des technologies de production d'acier sont présentés dans la Figure 4-4. Ils sont exprimés pour chaque catégorie d'impacts en pourcentages relatifs des émissions de chaque filière par rapport à celle de référence.

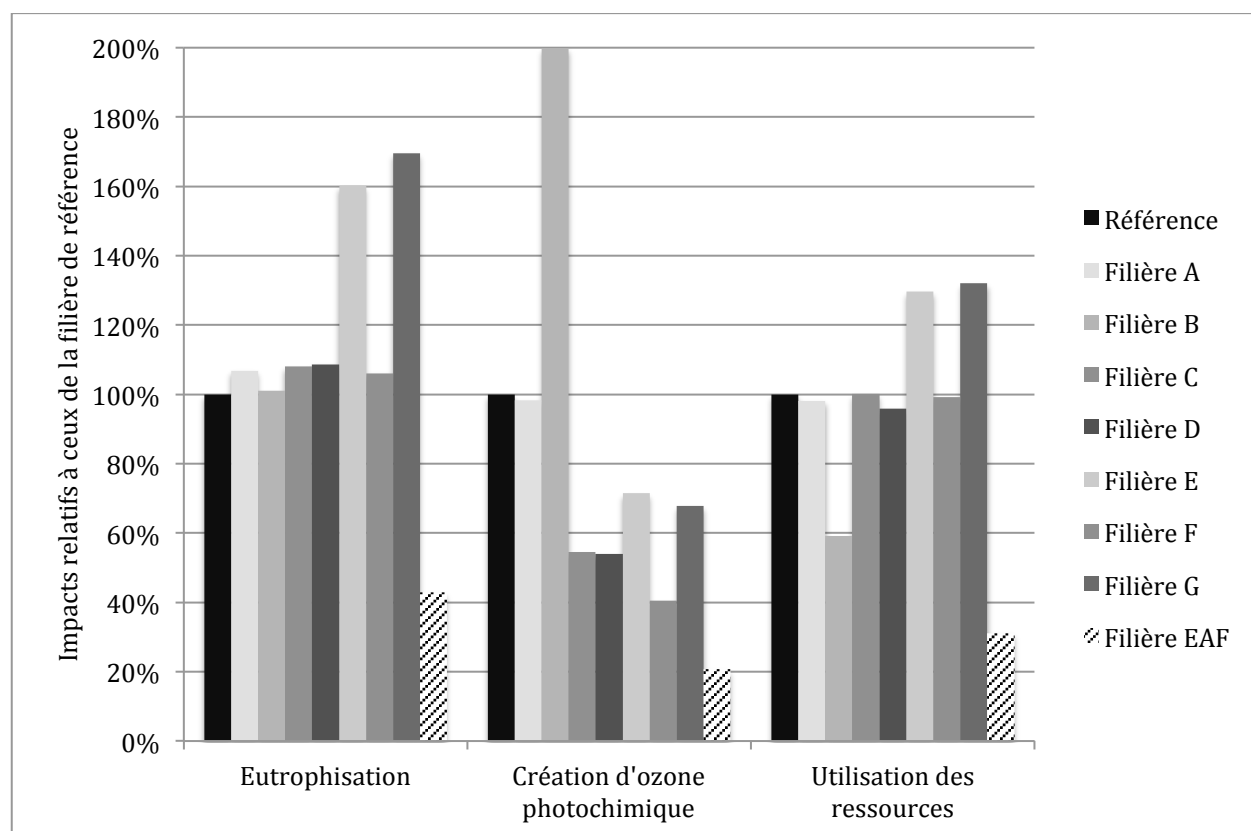
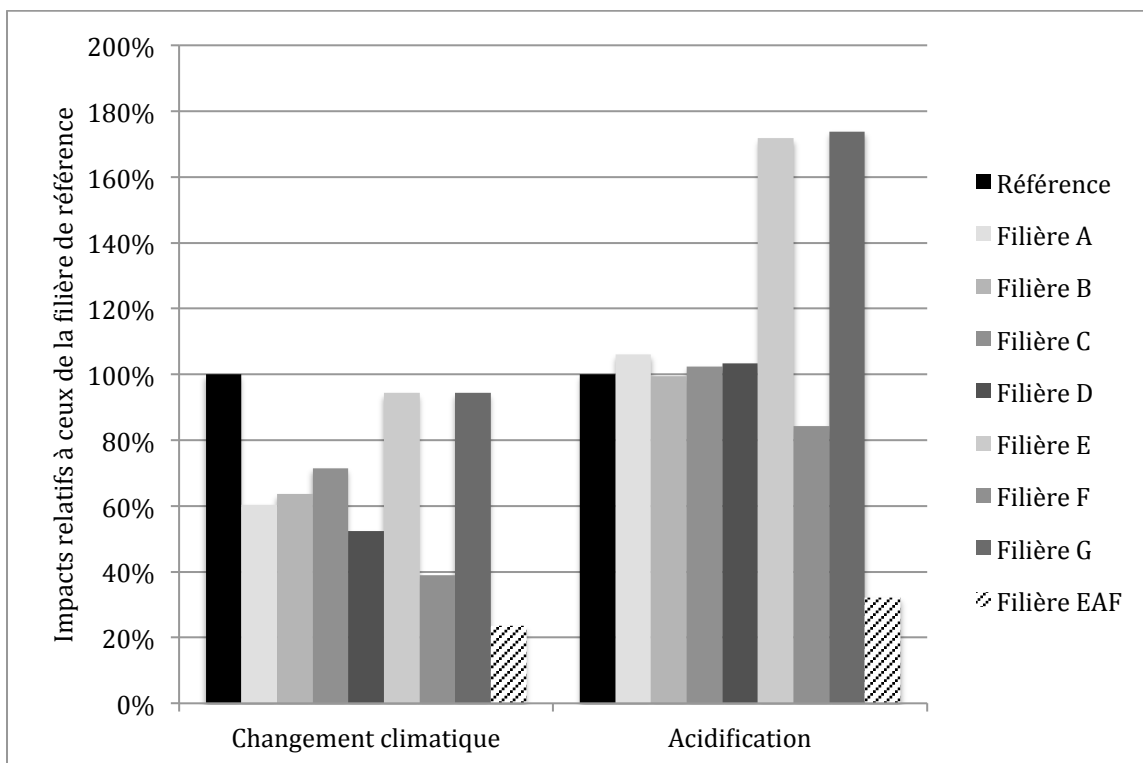


Figure 4-4 : Impacts relatifs des différentes filières à l'instant initial



Dans un premier temps, on constate que les tous impacts de la filière EAF sont beaucoup plus faibles que ceux de la filière de référence ou des nouvelles technologies de production d'acier. Ce facteur s'explique par l'utilisation de ferrailles comme matière première dans cette filière et par le choix du *cut-off* comme imputation pour ces matériaux. Le transport de ces matériaux est faible et tous les impacts associés à l'extraction des minerais ou du charbon sont évités car ils ne sont pas utilisés dans cette filière. De plus, l'arc électrique émettant peu de substances nocives, les impacts proviennent surtout de l'électricité qu'il consomme. La filière EAF présente donc, selon cette analyse, le meilleur bilan environnemental pour les catégories d'impacts considérées.

Dans un second temps, les résultats sont analysés pour chaque catégorie d'impacts. En comparaison à la filière de référence, les impacts dans la catégorie changement climatique sont réduits pour toutes les autres technologies. Ces résultats confirment que ces filières émettent moins de gaz à effet, ce qui est logique car elles ont été conçues dans cette optique.

Pour l'acidification, les résultats diffèrent selon les filières. Pour les premières (A, B, C et D), les impacts sont similaires à la filière de référence et même inférieurs pour la filière F. Par contre, les impacts sont beaucoup plus élevés pour les filières E et G, qui correspondent à celles par électrolyse. Ces résultats s'expliquent par la forte demande en électricité de ces filières et l'impact du mix électrique européen considéré pour cette analyse à l'instant initial.

Les résultats pour la catégorie eutrophisation sont les mêmes que pour l'acidification. Les filières E et G sont toujours beaucoup plus impactantes et les filières A,B,C,D ne présentent pas de grandes différences avec la référence. Contrairement à l'acidification, les impacts de la filière F y sont un peu plus importants.

Dans la catégorie création d'ozone photochimique, toutes les filières, sauf la filière B, ont un impact égal ou inférieur à la référence. Ce cas particulier s'explique par l'utilisation de réactifs différents pour cette filière par biomasse, qui conduisent à des émissions de COV élevées d'après les données utilisées.

Pour finir, les scores obtenus pour l'utilisation des ressources varient peu avec les filières. Ils sont légèrement supérieurs dans les filières par électrolyse (utilisation intensive d'électricité) et inférieurs dans celle par utilisation de biomasse car cette ressource biotique remplace du charbon,

qui est une ressource abiotique. Pour les autres technologies, les consommations en minerais et en charbon sont semblables à la référence donc les impacts varient peu.

Cette analyse montre l'intérêt d'utiliser une approche cycle de vie dans l'évaluation de nouvelles technologies pour éviter un déplacement d'impact entre les étapes ou entre les catégories d'impacts (Clift, 2006). Si aucune attention n'est portée sur cet aspect, les nouvelles technologies développées pour lutter contre les émissions de gaz à effet de serre peuvent conduire à une augmentation des impacts dans d'autres catégories. Dans ce cas, elles ne représentent pas forcément, au niveau de développement actuel, de bonnes solutions d'un point de vue environnemental global. Il est donc important de vérifier que, lors de leurs implantations, elles ne vont pas causer ces impacts indésirables.

#### **4.4.2 Analyses de contribution**

Pour analyser plus précisément les résultats et mieux comprendre les différences entre les filières, des analyses de contribution ont été effectuées. Elles permettent de visualiser l'influence des différentes étapes du cycle de vie dans les impacts potentiels calculés. Le cycle de vie a été divisé en six catégories pour cette analyse : l'extraction des matières premières, le transport, le site, l'électricité, les déchets et les coproduits.

La première catégorie regroupe toutes les étapes d'extraction et de mise en forme des matières premières avant leur arrivée sur le site de production. Le transport regroupe toutes les sortes de transport sur l'ensemble du cycle de vie (par bateau, par train, par camion, par pipeline, ...). Le site contient toutes les émissions associées aux procédés présents sur le site. L'électricité correspond aux impacts issus de la production d'électricité, c'est-à-dire l'acquisition des matières premières transformées en énergie et leur transformation en électricité. Les déchets incluent la mise en décharge de tous les sous-produits non-valorisés et les coproduits correspondent à ceux qui sont valorisés. Ces derniers ont une contribution négative à la valeur totale de l'impact.

Pour chaque catégorie, les impacts ont été étudiés de façon précise pour en déterminer l'origine et les substances de l'inventaire y contribuant. Par souci de confidentialité de certaines données, les résultats ne sont présentés dans ce mémoire que de manière succincte et uniquement

pour la filière de référence et la filière G, qui est une des filières par électrolyse. Ces deux filières sont représentatives des résultats pour toutes les autres. Globalement, l'allure des graphiques de contribution pour les filières A, B, C, D et F est semblable à celle de la filière de référence et les filières E et G présentent de leur côté des résultats très similaires. Les Figures 4-5 et 4-6 illustrent cette analyse de contribution.

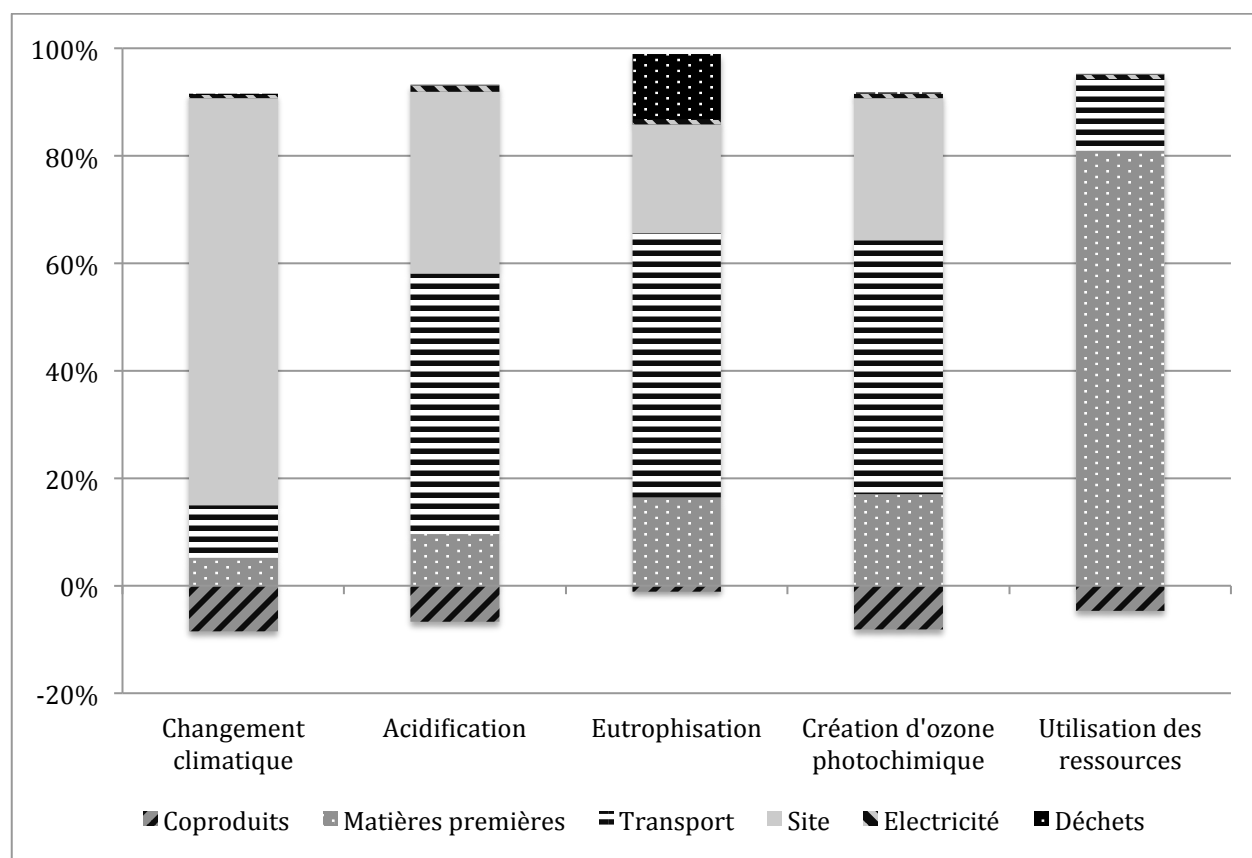


Figure 4-5 : Analyse de contribution - filière de référence

Pour la catégorie changement climatique, la majorité des impacts (91%) proviennent des émissions de gaz à effet de serre (essentiellement du CO<sub>2</sub>) du site. En plus du site, le transport et l'extraction des matières premières contribuent au restant des émissions. La valorisation des coproduits, en particulier du laitier de haut fourneau, permet un crédit d'un dixième des émissions totales.

Les impacts de la catégorie acidification proviennent pour 56% du transport, pour 39% du site et pour le reste des autres catégories. Pour le transport, c'est celui par bateau (en particulier celui du minerai de fer) qui contribue principalement à cette partie de l'impact. Du point de vue des

substances, cet impact est majoritairement dû à des émissions d'oxydes de soufre et d'oxydes d'azote.

Pour l'eutrophisation, 50% des impacts proviennent du transport. Dans ce cas, l'impact est encore principalement dû au transport par bateau. Pour la part due aux matières premières, l'impact provient surtout de la production de charbon. D'un point de vue global, les principales substances contribuant à l'impact sont les oxydes d'azote (émissions sur le site et lors du transport), le phosphate (principalement issu de la mise en décharge des laitiers) et l'ammoniac (provenant surtout des explosifs utilisés lors de l'extraction du charbon et du minerai le fer).

Pour la contribution à la création d'ozone photochimique, le transport (principalement celui par bateau) contribue à 57% de cet impact, principalement via des émissions d'oxydes de soufre et de composés organiques volatils (combustion de l'essence). En outre, le site, en particulier par ses émissions de monoxyde de carbone, représente 30% de cet impact. La valorisation des coproduits conduit à un crédit de 10% des émissions totales grâce à l'utilisation de laitiers comme clinker.

L'extraction des matières premières contribue majoritairement à l'impact sur l'extraction des ressources ; ce qui est logique car c'est dans cette partie que les ressources sont transformées en flux économiques. Une petite partie est due au transport à cause de l'utilisation de carburants fossiles. Du point de vue des substances contribuant à cet impact, c'est le charbon qui est largement majoritaire avec plus de 90% du total. Le reste provient surtout de l'essence. La contribution de l'extraction de minerai de fer est négligeable car dans la méthode d'EICV utilisée, son épuisement est considéré comme beaucoup moins important que celui des combustibles fossiles, donc le facteur de caractérisation associé est faible.

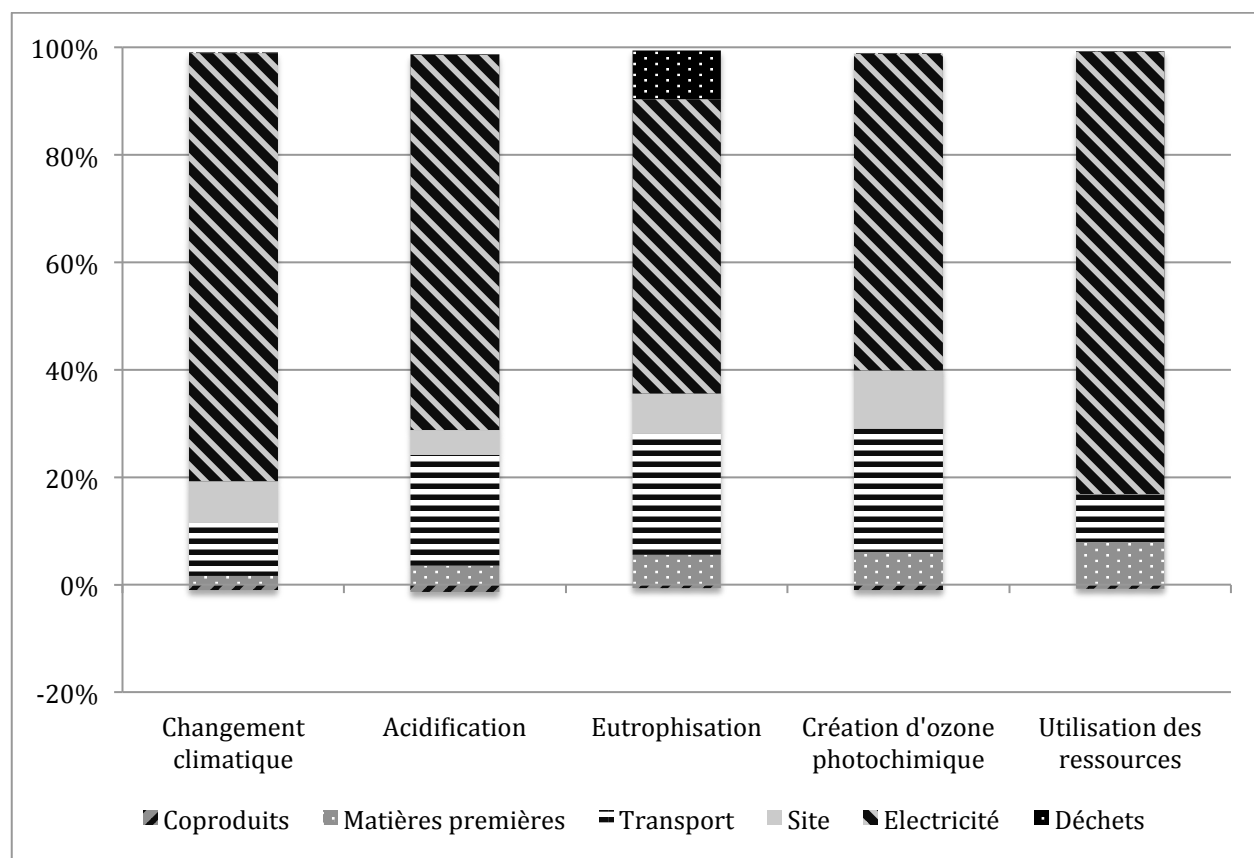


Figure 4-6 : Analyse de contribution - filière G

Pour la filière G, l'électricité contribue à une grande majorité des impacts (de 48% à 83%) alors que le site n'est quasiment pas influent (entre 0% et 10%). Comme précédemment, le transport a un rôle non négligeable dans la part d'impact (de 9% à 22%), mais il est moindre car la consommation électrique (et donc son impact associé) est très forte.

Pour le changement climatique, l'électricité représente 80% des impacts totaux. Le restant provient du site où ont lieu quelques émissions de CO<sub>2</sub> ainsi que du transport. Pour l'acidification, l'eutrophisation et la création d'ozone photochimique, les impacts autres que l'électricité sont principalement causés par le transport et les émissions sur le site. Du point de vue des substances émises, ce sont surtout des particules, des oxydes de soufre et d'azote et des COV.

L'utilisation des ressources est elle aussi dominée par l'électricité. La disparition de l'utilisation du charbon réduit massivement son impact et sa proportion de la catégorie matières premières. Les carburants du transport contribuent au reste des impacts.

### 4.4.3 Analyse de sensibilité sur la méthode d'EICV

Le choix de la méthode d'évaluation des impacts est un paramètre influant sur les résultats d'une analyse du cycle de vie. Pour tester la sensibilité de ce paramètre, l'étape d'EICV a été conduite en remplaçant la méthode CML par la méthode Impact 2002+. Cette méthode propose des indicateurs au niveau problème et au niveau dommage. Pour garder une concordance avec l'analyse, des catégories « problèmes » équivalentes à celles choisies dans CML ont été conservées (changement climatique, acidification, eutrophisation, création d'ozone photochimique, utilisation des ressources). Les chaînes d'impacts et les facteurs de caractérisation diffèrent entre ces deux méthodes. La comparaison n'est donc pas effectuée sur les scores obtenus, mais plutôt sur les impacts relatifs de chaque filière par rapport à celle de référence. Les Figures 4-7 et 4-8 présentent les résultats obtenus.

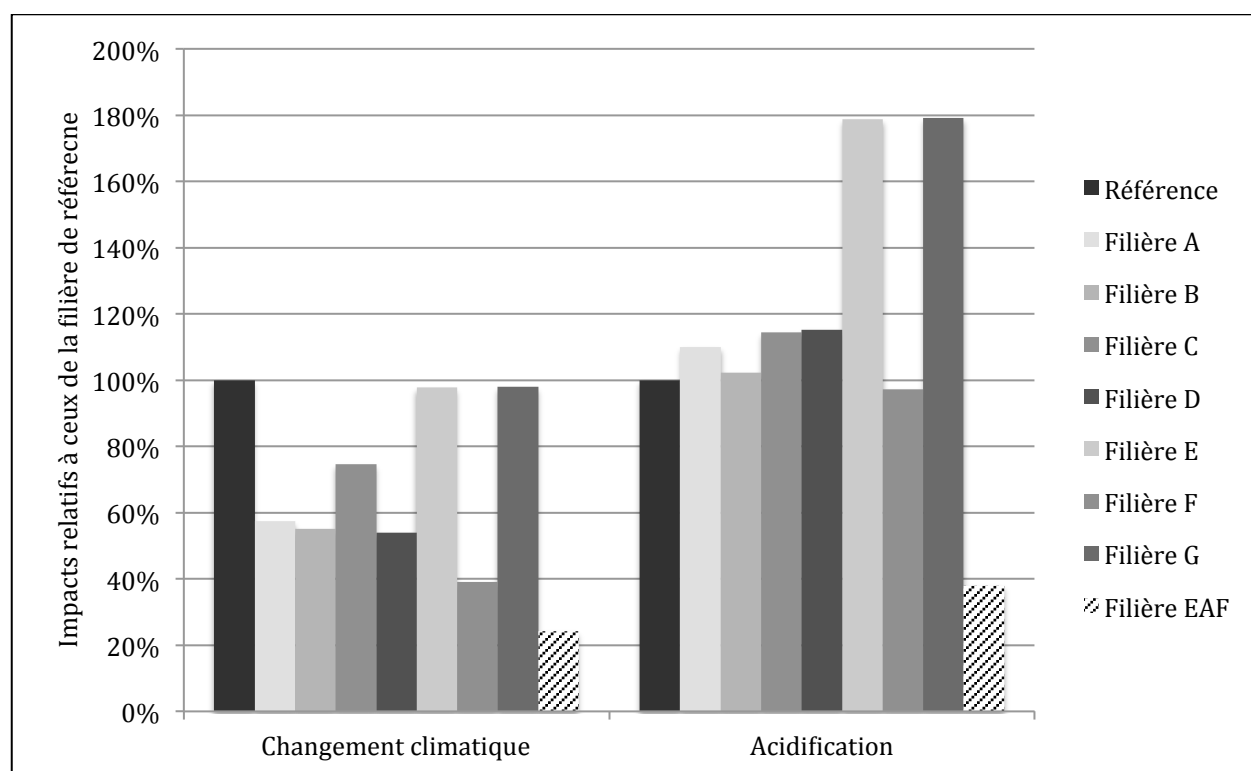


Figure 4-7 : Impacts relatifs des différentes filières à l'instant initial avec Impact 2002+

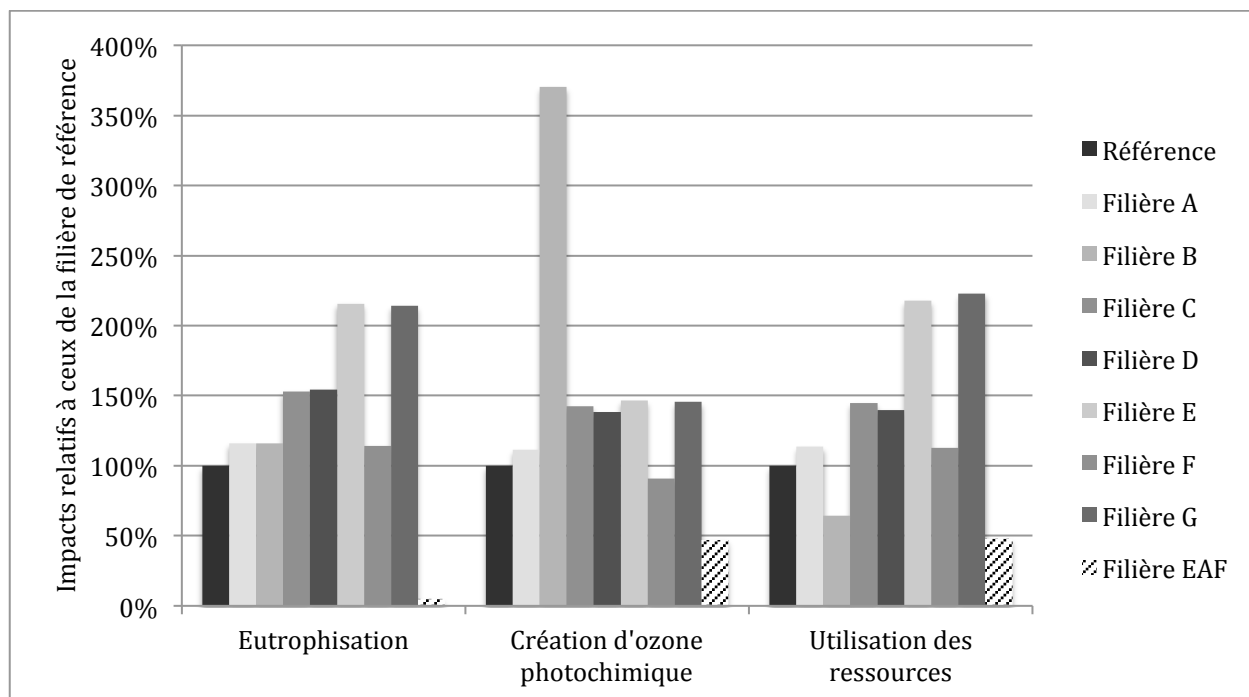


Figure 4-8 : Impacts relatifs des différentes filières à l'instant initial avec Impact 2002+, suite

Globalement, les résultats obtenus avec la méthode d'EICV Impact 2002+ sont semblables à ceux présentés dans les Figures 3-4 et calculés avec la méthode CML 2001. La plus grande différence est observée dans la catégorie création d'ozone photochimique. Relativement à ceux de la filière de référence, les impacts des autres filières sont plus élevés avec cette nouvelle méthode d'EICV qu'avec CML. Par exemple, l'impact relatif de la filière B passe de 200% dans l'EICV avec CML à 371% avec Impact 2002+ car les facteurs de caractérisations, en particulier pour les COV, sont plus élevés dans cette deuxième méthode d'EICV. Pour les filières A, C, D, E et G, les impacts relatifs sont supérieurs à la référence alors qu'ils étaient inférieurs dans la Figure 4-4. Dans la catégorie changement climatique, les scores sont toujours inférieurs à la filière de référence pour toutes les autres filières étudiées. Pour les catégories d'impacts acidification et eutrophisation, les résultats sont quasiment identiques avec cette nouvelle méthode à ceux calculés avec CML. Les impacts relatifs sont toujours proches de la référence pour toutes les technologies sauf les filières E et G, où ils dépassent nettement la référence. La seule différence majeure pour ces deux catégories est le plus faible impact relatif de la filière EAF dans la catégorie eutrophisation (5% avec Impact 2002+ au lieu de 24% avec CML). Dans la dernière catégorie d'impacts, l'utilisation des ressources, les scores sont proches de ceux

obtenus avec CML. Néanmoins, pour les filières C et D, les impacts deviennent supérieurs à la filière de référence avec la nouvelle méthode d'EICV.

Cette comparaison des résultats avec deux méthodes d'EICV montre que les résultats sont globalement semblables, avec néanmoins quelques petites différences dans certaines filières et catégories. Les filières autres que celle de référence ont toujours un impact inférieur dans la catégorie changement climatique et des résultats plus mitigés dans les autres catégories d'impacts. La conclusion générale est donc toujours la même : ces nouvelles filières conduisent bien à une diminution des émissions de GES mais il faut être attentif à ne pas déplacer les impacts dans d'autres catégories.

## 4.5 Synthèse des résultats

Parmi toutes les filières étudiées dans cette analyse du cycle de vie, la filière EAF est celle qui présente le meilleur bilan environnemental pour les catégories d'impacts considérées. Même si ce résultat est dû au choix de la méthode d'imputation pour la considération du recyclage de l'acier, la fabrication d'acier par voie secondaire semble une meilleure solution pour produire de l'acier que l'utilisation du minerai et doit donc être encouragée, dans la limite des stocks de ferrailles disponibles. Pour les autres technologies étudiées se rattachant à la voie primaire, cette analyse du cycle de vie initiale a permis de montrer que les nouvelles technologies étudiées conduisent bien à une diminution des impacts sur le changement climatique par rapport à ceux de la filière de référence. Cependant, un déplacement d'impacts est observé dans certains cas vers d'autres catégories d'impacts, ce qui est non souhaité et doit par conséquent être pris en compte dans le développement futur de ces technologies.

L'analyse de contribution a permis de cibler les processus ou catégories de l'inventaire ayant le plus d'impacts sur les résultats de cette analyse. D'un point de vue général, dans les catégories d'impact liées aux émissions autres que le changement climatique (acidification, eutrophisation et création d'ozone photochimique), les deux catégories de l'inventaire les plus contributrices sont, pour toutes les filières, le transport et l'électricité. L'étude prospective présentée dans le chapitre 5 se consacrera donc, dans un premier temps, à la modélisation des variations temporelles de ces deux aspects du cycle de vie.



## **CHAPITRE 5 DÉVELOPPEMENTS PROSPECTIFS ASSOCIÉS À L'ÉLECTRICITÉ ET AU TRANSPORT**

L'analyse du cycle de vie initiale a montré la contribution importante du transport et de l'utilisation d'électricité dans les impacts des technologies étudiées. La réflexion est donc posée sur la variation temporelle de ces deux aspects et sur son influence sur les résultats initiaux. Le terme analyse du cycle de vie initiale sera utilisé dans la suite de ce mémoire pour désigner l'analyse attributionnelle effectuée à l'année 2000, telle que présentée dans le chapitre 4.

### **5.1 Évolution prospective de l'électricité**

Le premier facteur étudié dans cette analyse prospective est la variation du mix d'électricité sur l'horizon de temps étudié. Dans un premier temps, les données prospectives utilisées puis les résultats de l'évolution des impacts du mix électrique sont présentés. L'influence de cette évolution sur l'inventaire initial est finalement montrée.

#### **5.1.1 Modélisation prospective de la variation du mix électrique**

Outre les données sur l'évolution de la production d'acier, les simulations effectuées avec le modèle POLES ont aussi permis de modéliser l'évolution du mix électrique sur la période de temps étudiée. Dans cette partie, ces données sont appliquées à l'analyse du cycle de vie initiale. Elles permettent de changer le mix électrique utilisé, c'est-à-dire le pourcentage de chaque source d'électricité. Cette première étape dans l'application de la démarche prospective est indispensable car il a déjà été souligné que les résultats peuvent être fortement influencés par la composition de ce mix électrique (Frischknecht, Büsser, & Krewitt, 2009). Les données pour les deux scénarios considérés dans l'étude sont présentées dans la Figure 5-1.

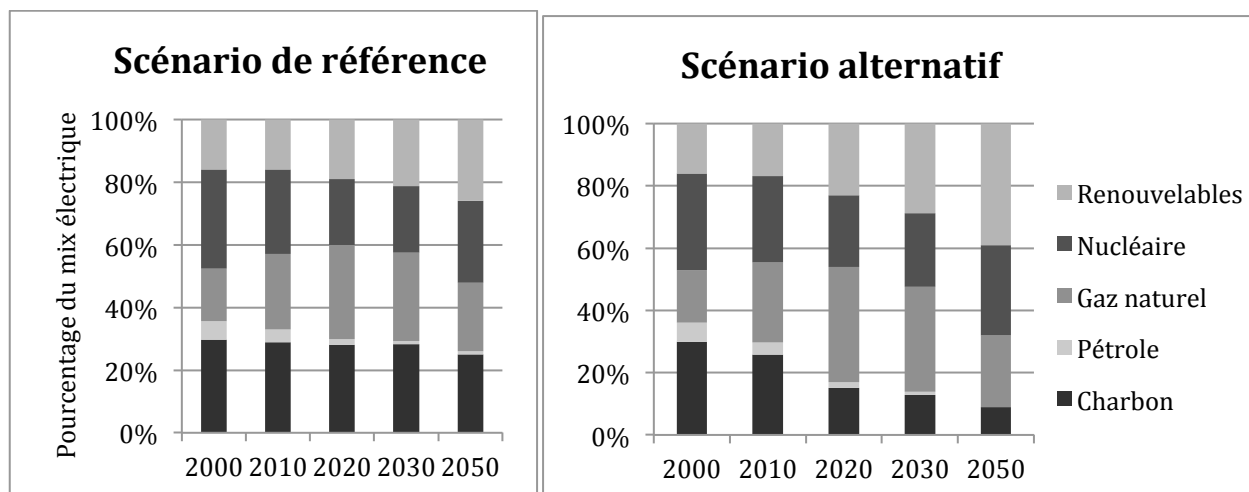


Figure 5-1 : Évolution des mix électriques européens entre 2000 et 2050  
pour les deux scénarios étudiés

On observe que dans les deux scénarios, la part d'électricité issue d'énergies renouvelables augmente avec le temps. Cette observation est d'autant plus forte dans le scénario alternatif où l'incitation à une transition vers une électricité plus « verte » est présente. Les résultats de l'application de ces changements à l'analyse du cycle de vie initiale sont présentés dans le paragraphe 5.1.3.

### 5.1.2 Évolution des impacts associés à l'électricité

La figure présentée ci-dessous représente la variation des impacts associés à la production d'un kilowattheure d'électricité entre les mix électriques de l'année 2050 pour les deux scénarios étudiés et celui de l'année initiale (2000).

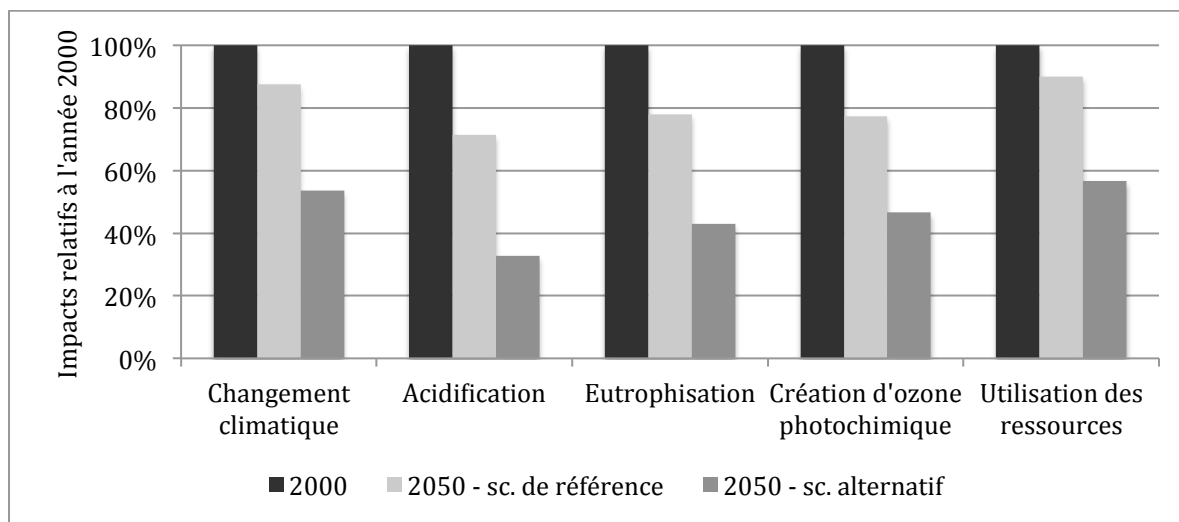


Figure 5-2 : Variation des impacts associés à la production d'électricité selon les deux scénarios étudiés

Les scénarios de variation du mix électrique ont été modélisés pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, ce qui est vérifié par les résultats présentés de ce graphique. Pour les deux scénarios, les impacts de gaz à effet de serre sont diminués respectivement de 13% et 46%. Cependant, le changement de mix électrique n'a pas seulement une influence sur le changement climatique mais aussi sur les autres catégories d'impact considérées. Ceci traduit les co-bénéfices de la variation du mix dans ces catégories. Pour le scénario de référence, la diminution de 13 % de l'impact sur le changement climatique correspond à une diminution de 29 % sur l'acidification et de 22 % sur l'eutrophisation. La baisse des impacts dans une catégorie bénéficie aussi aux autres types d'impact étudiés.

### 5.1.3 Influence de la variation de l'électricité sur les résultats

La variation des impacts liés à l'électricité a été appliquée à l'analyse initiale pour évaluer son influence sur les résultats de notre analyse en fonction des filières étudiées. Les résultats de cette étude sont présentés ci-dessous. Les graphiques représentent pour chaque filière la diminution des impacts en 2050 par rapport aux impacts de 2000, pour les deux scénarios. Seuls les résultats pour les catégories changement climatique et acidification sont présentés. Les

tendances des résultats sont semblables pour les catégories d'impact eutrophisation, création d'ozone photochimique et utilisation des ressources.

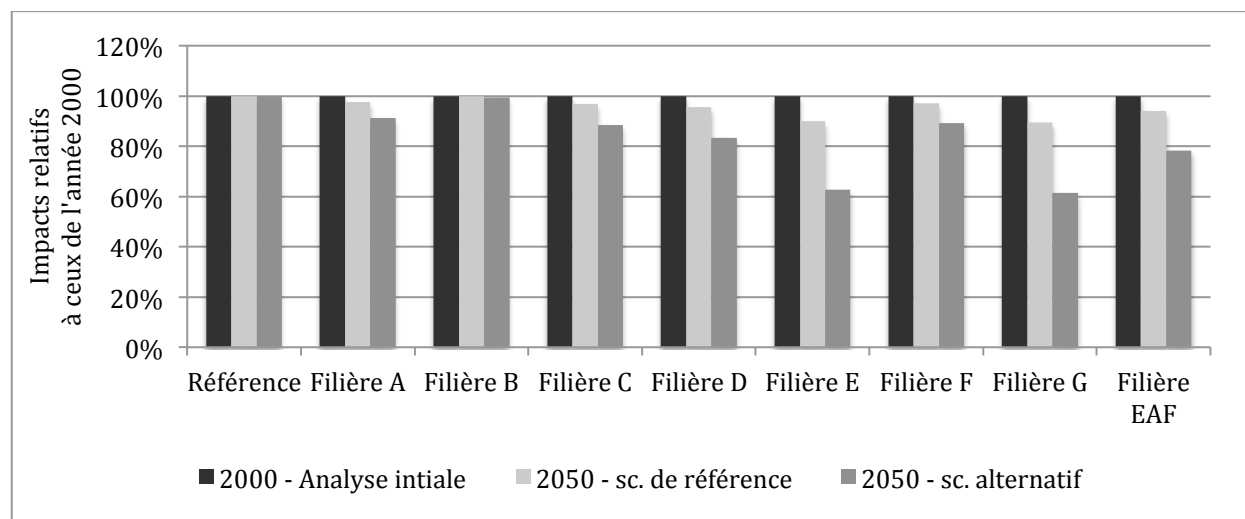


Figure 5-3 : Influence de la variation du mix électrique sur l'analyse initiale - catégorie changement climatique

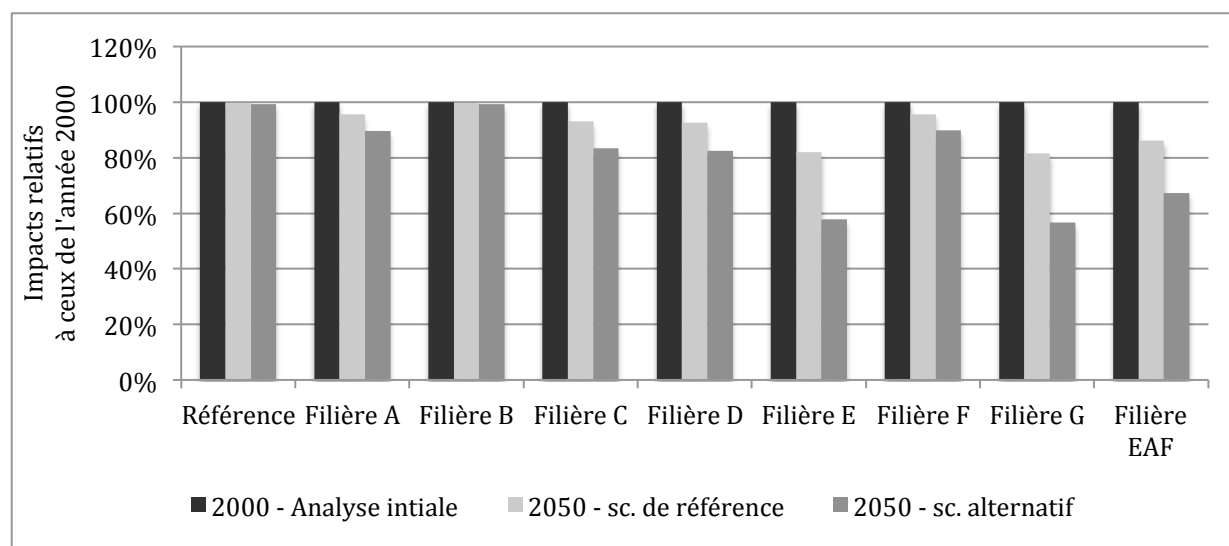


Figure 5-4 : Influence de la variation du mix électrique sur l'analyse initiale – catégorie acidification

L'influence de la réduction des impacts dépend du scénario et de la filière. Plus la filière est utilisatrice d'électricité, plus l'impact sur les résultats est visible. Ainsi, le changement du mix électrique n'affecte quasiment pas la filière de référence car elle n'utilise presque pas d'électricité provenant de l'extérieur du site. La plupart de sa consommation est produite à partir des excès de

gaz de procédés. À l'inverse, les filières par électrolyse (F et H) et la filière par four à arc électrique sont les plus consommatrices d'électricité et par conséquent les plus influencées par cette variation. En outre, le scénario alternatif, qui est le plus restrictif, conduit à une plus grande diminution des impacts que le scénario de référence par rapport à l'analyse initiale.

## 5.2 Évolution prospective du transport

Il est reconnu que le transport a une influence non négligeable sur les impacts des analyses du cycle de vie de la production d'acier (Yellishetty, Mudd, & Ranjith, 2011). Ce résultat a été confirmé par l'analyse de contribution effectuée sur l'ACV initiale à la fin du chapitre 3. Il est donc nécessaire de considérer la possible évolution des modes et distances de transport dans notre étude prospective. Pour évaluer cette influence du transport, le cas de la filière de référence a été choisi car il représente la filière où le transport a le plus d'impacts. Une analyse de contribution sur les impacts associés au transport a montré qu'environ 80% de ceux-ci étaient dus au transport du minerai de fer, 13% au charbon et 7% au transport des autres matières premières. L'étude s'est donc focalisée sur le transport du minerai de fer, qui est le plus impactant. Dans les données utilisées, ce transport est calculé directement, comme détaillé dans le paragraphe 3.2.3. Pour étudier l'effet du temps sur ce calcul, il a été effectué de la même manière à partir de données comprises entre les années 2000 et 2010 (Jorgenson, Tolcin, & Roberts, 2002, 2004; World Steel Association, 2011, 2012). Les tableaux récapitulatifs des calculs sont disponibles en Annexe II. Le Tableau 5-1 montre l'évolution des distances de transport sur les trois modes affectés pour le transport du minerai de fer entre les années 2000 et 2010.

Tableau 5-1 : Variation des distances de transport pour le minerai de fer

Mode de transport	Variation de la distance totale transportée (km) (par rapport à l'année 2000)					
	2000	2002	2004	2006	2008	2010
Train	0%	4%	4%	6%	8%	9%
Bateau	0%	2%	1%	0%	-4%	5%
Barge	0%	1%	1%	-1%	-3%	9%

La variation des distances de transport ne montre aucune réelle tendance qui pourrait être extrapolée sur toute la période de l'analyse. Pour visualiser l'influence de cette évolution sur les résultats initiaux, les impacts ont été recalculés à partir de ces nouvelles distances et sont disponibles en Annexe II. Pour les cinq catégories étudiées, les impacts varient entre 96% et 102% par rapport à ceux de l'analyse initiale. Cette variation est donc faible et aucune tendance n'est exploitable. La filière de référence étant celle où la contribution du transport est la plus importante, les conclusions sont identiques pour les autres filières. L'évolution du transport n'est donc pas considérée comme un paramètre déterminant dans notre analyse prospective. Il ne sera pas pris en compte dans la suite de notre étude.

## CHAPITRE 6 ÉVOLUTION PROSPECTIVE DES TECHNOLOGIES

Après avoir testé dans les parties précédentes l'influence du temps sur les impacts associés à l'électricité consommée et au transport des matières premières, cette partie focalise sur un aspect novateur considéré dans ce projet, qui est la prise en compte de l'impact de futures politiques environnementales dans une étude prospective. La méthodologie proposée pour considérer ce facteur est d'abord expliquée puis son application dans le cas concret à l'étude est développée.

### 6.1 Prise en compte de l'effet des politiques environnementales sur les données d'inventaire

Pour modéliser l'influence des politiques environnementales au cas concret de la réalisation d'un inventaire, une approche dynamique est proposée avec l'application de facteurs de réduction à l'ICV. Ces facteurs retranscrivent les futurs objectifs de réduction à un inventaire calculé à l'heure actuelle ( $t=0$ ). Pour chaque émission d'une substance  $i$  considérée dans l'inventaire, l'émission à l'instant  $t$  est alors calculée avec la formule suivante :

$$\text{émission}_i(t) = \text{émission}_i(t = 0) \times FR_i(t) \quad (6.1)$$

où  $FR_i(t)$  est le facteur de réduction pour la substance  $i$  à l'instant  $t$ .

Le facteur de réduction ne correspond cependant pas directement à l'objectif de réduction car il doit prendre en considération la variation d'activité du processus considéré. En effet, si par exemple la production totale du processus étudié augmente entre l'instant initial et l'instant  $t$ , le facteur de réduction de l'émission par unité produite doit être plus important que l'objectif de réduction global pour permettre de prendre en compte cette variation de l'activité. L'effet inverse est bien sûr aussi observable. Pour refléter cet aspect, l'objectif de réduction est pondéré par la variation de production entre l'instant initial et l'instant  $t$ . Cette étape permet de transformer un objectif global en objectif spécifique, c'est-à-dire par unité de produit sortant du processus. La formule du calcul d'un facteur de réduction est donc la suivante :

$$FR_i(t) = [1 - OR_i(t)] \times \frac{p(t=0)}{p(t)} \quad (6.2)$$

où  $OR_i(t)$  est l'objectif de réduction pour la substance  $i$  à l'instant  $t$  et  $p(t)$  la production globale du produit étudié, à la même échelle géographique que celle utilisée pour l'objectif de réduction.

Ce raisonnement est similaire à celui utilisé par l'Agence de Protection de l'Environnement des États-Unis (US EPA) dans ses travaux de prospective des émissions menés pour l'analyse des impacts de politiques de régulation (Stallworth, 2006). Les émissions futures sont projetées en multipliant les émissions actuelles par un facteur d'ajustement de la croissance des activités  $\left(\frac{p(t=0)}{p(t)}\right)$  et par un autre d'ajustement des objectifs de contrôle  $(1 - OR(t))$ .

## 6.2 Application de la méthodologie

La méthodologie présentée ci-dessus est appliquée à l'analyse du cycle de vie initiale pour y refléter l'évolution des technologies avec le temps. Dépendamment des deux scénarios étudiés, des données différentes sont utilisées pour le calcul des facteurs de réduction.

Les facteurs de réduction n'ont pas été calculés de manière précise pour toutes les émissions de l'ICV établi dans l'analyse du cycle de vie initiale. En effet, l'étude se limitant à certaines catégories d'impacts (changement climatique, acidification, eutrophisation, création d'ozone photochimique et utilisation des ressources), seules les émissions contribuant à ces impacts ont fait l'objet d'une étude sur les politiques environnementales à leur appliquer. Selon Sleeswijk et al (2008), avec la méthode d'EICV CML et pour les impacts totaux à l'échelle de l'Europe, seules dix substances (ou groupe de substances) contribuent à la quasi totalité des impacts non-toxiques considérés dans notre étude :  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $SO_2$ ,  $NO_x$ ,  $NH_3$ ,  $PM_{10}$ , NMVOC et (H)CFCs. La priorité des politiques environnementales est donc mise sur ces émissions et par conséquent, des objectifs de réduction ne sont disponibles que pour ces substances. L'analyse de contribution effectuée dans l'étude initiale a confirmé que pour notre étude, ce sont aussi ces substances qui contribuent à la très grande majorité des impacts. Ce sont donc ces données qui ont été recherchées et utilisées dans ce projet. Pour les autres émissions, des données génériques ont été utilisées mais la pertinence de ce choix sera discutée dans les résultats. La pertinence de



n'appliquer les facteurs de réductions seulement aux données d'inventaire est par ailleurs développée dans la partie 8.3.

### **6.2.1 Le facteur d'ajustement de la croissance des activités**

Dans ce cas d'étude,  $p(t)$  a été représenté par la production d'acier. Ce choix suppose que pour les autres processus auxquels les facteurs s'appliquent, la variation des activités va suivre celle de la production d'acier. Cette proportionnalité repose sur la supposition que l'acier étant un des matériaux de base dans notre société actuelle, les différents secteurs sont fortement reliés à son activité. Ce choix méthodologique sera discuté dans le chapitre 8. L'évolution de la production d'acier a été modélisée dans le cadre du projet ULCOS et ce sont les données présentées dans les Figures 3-4 et 3-5 qui ont été utilisées. L'application de ce facteur est non négligeable car il est prévu que la production d'acier augmente de manière significative dans les prochaines années. Pour le scénario de référence, un pourcentage de réduction des émissions de 50% en 2050 équivaut par exemple à un pourcentage de réduction de 69% avec la pondération par la variation de production.

### **6.2.2 Le facteur d'ajustement des objectifs de contrôle**

Pour déterminer les objectifs de réduction sur les substances retenues, une revue de normes et de directives actuelles a été effectuée. En particulier, il est logique de s'intéresser aux publications des organismes à l'origine du développement de ces normes. Outre le réchauffement climatique, où de nombreux travaux ont été effectués, la problématique de la qualité de l'air est elle aussi largement considérée par les différents gouvernements et organisations internationales. Cette catégorie touche principalement les impacts liés à l'acidification et la création d'ozone photochimique, et indirectement à l'eutrophisation, ce qui correspond aux catégories considérées dans notre étude.

Le rapport sélectionné pour déterminer les objectifs de réduction a été publié par l'International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) et est intitulé « Future emissions of air pollutants in Europe – Current legislation baseline and the scope for further reductions » (Amann et al., 2012). Ce rapport, publié en juin 2012, a été réalisé pour le compte de la Direction Générale de l'Environnement de la Commission Européenne. Il vise à présenter l'influence des directives actuelles en matière de contrôle de la pollution de l'air sur les émissions futures. Les

modélisations sont basées sur les données relevées à l'année 2005 et présentent leur évolution attendue jusqu'à l'an 2050. La limite géographique de l'étude comprend les 27 pays de l'Union Européenne (UE27). Le modèle utilisé pour cette étude est celui développé dans le cadre du projet EC4MACS (European Consortium for Modelling of Air pollution and Climate Strategies). En intégrant divers modèles spécifiques à certains secteurs (POLES, PRIMES, CAPRI, ...) et d'autres axés sur la prise en compte de politiques environnementales, il permet de simuler à la fois les émissions atmosphériques des principaux polluants et l'évolution de certains paramètres comme la consommation énergétique, la demande en transport ou la production agricole. En effet, pour modéliser l'évolution de ces émissions, il est indispensable de connaître celle des domaines qui sont à leur source. Les projections présentées concernent donc aussi la population, le PIB, la demande en énergie et la production de différents secteurs d'activités.

Plusieurs scénarios sont présentés dans ce rapport mais seuls deux sont utilisés pour notre étude. Le premier est le scénario de base qui modélise les évolutions en se basant sur les directives actuelles et le second est un scénario décarboné qui représente une diminution des gaz à effet de serre de 80% d'ici 2050 à l'échelle de l'Union Européenne. À partir des valeurs simulées de l'évolution des émissions totales dans le temps, des objectifs de réduction sont calculés pour chaque scénario en faisant le rapport entre les émissions à un instant donné et celles à l'instant initial (année 2000). Les objectifs issus du scénario de base sont appliqués pour représenter l'évolution des politiques environnementales dans le cas du scénario de référence et ceux du scénario décarboné sont utilisés pour le scénario alternatif de notre étude. Un des points cruciaux est la concordance entre ces différents scénarios. Il serait incorrect d'utiliser deux scénarios basés sur des hypothèses très différentes pour représenter une même vision du futur. Dans notre cas, les deux scénarios utilisés pour la référence se basent sur une poursuite des activités et politiques actuelles sans plus d'interventions futures alors que les scénarios pour la version alternative se basent sur une diminution importante des émissions de GES sous l'influence de politiques spécifiques (un facteur 4, i.e. 75% dans le scénario de ULCOS et un facteur de 80% dans le rapport de l'IIASA). L'utilisation de ces scénarios développés séparément concorde donc pour représenter les deux visions du futur étudiées.

Les objectifs de réduction dépendent des secteurs d'activité. En effet, les législations sont par exemple différentes entre les secteurs du transport et de la production d'énergie. Les objectifs de réduction vont donc être plus importants dans certains secteurs et moindres dans d'autres. Ce

facteur est, bien entendu, pris en compte dans les modélisations du rapport considéré. Pour ce faire, les prévisions des émissions sont réparties selon onze secteurs, appelés catégories SNAP (Selected Nomenclature for Air Pollution) et présentés dans le Tableau 6-1.

Tableau 6-1 : Catégories SNAP

<b>Indice SNAP</b>	<b>Secteur</b>
1	Combustion dans les secteurs de l'énergie et des industries de la transformation
2	Sites de combustion non industrielle
3	Combustion dans l'industrie manufacturière
4	Procédés de production
5	Extraction et distribution de combustibles fossiles et énergie géothermique
6	Utilisation de solvant et d'autres produits
7	Transport routier
8	Autres sources mobiles et machines
9	Traitement et disposition des déchets
10	Agriculture

Les substances prises en compte dans ce rapport, qui sont listées ci-dessous, correspondent à celles ciblées dans le début de cette partie :

- le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>)
- les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>)
- les composés organiques volatils (COV), dont la liste est détaillée en Annexe III.
- l'ammoniac (NH<sub>3</sub>)
- les fines particules en suspension (PM)

Les objectifs de réduction issus de ce rapport sont regroupés en Annexe III. Le Tableau 6-2 donne un exemple d'objectifs de réduction pour le dioxyde de soufre dans le cas du scénario de référence.

Tableau 6-2 : Objectifs de réduction pour le dioxyde de soufre, scénario de référence

SNAP	Objectifs de réduction des émissions					
	2000	2010	2020	2030	2040	2050
1	0%	65%	88%	90%	93%	94%
2	0%	30%	45%	56%	59%	60%
3	0%	55%	58%	59%	58%	56%
4	0%	28%	26%	25%	27%	29%
5	0%	0%	0%	0%	0%	0%
6	0%	0%	0%	0%	0%	0%
7	0%	96%	96%	96%	96%	96%
8	0%	53%	55%	83%	83%	83%
9	0%	0%	50%	50%	50%	50%
10	0%	8%	8%	8%	8%	8%
Total	0%	59%	76%	79%	81%	82%

Pour certaines substances, les modélisations du rapport prévoient sur une période initiale une légère augmentation des émissions totales à cause de politiques de réduction peu performantes ou d'une augmentation de l'activité. Ce phénomène se traduit par des objectifs de réduction négatifs, qui ne sont pas pris en compte dans les calculs sur l'inventaire. Dans ce cas, le facteur de réduction est considéré comme nul. Pour une quantité donnée de produits, les émissions de chaque processus ne vont pas augmenter donc il serait faux d'appliquer un tel facteur sur l'inventaire.

Ces substances correspondent bien aux substances ciblées précédemment comme principales contributrices pour les impacts étudiés. Seuls les gaz à effet de serre ne sont pas directement étudiés dans les données utilisées. Pour les GES, les facteurs ont été choisis pour concorder avec les objectifs des deux scénarios de l'étude. Dans le cas du scénario de base, une diminution linéaire de 50% des émissions de gaz à effet de serre entre les années 2000 et 2050 est utilisée indépendamment du secteur d'activité et pour le scénario décarboné, la diminution est de 80%. La liste des gaz à effet de serre considérés est disponible en Annexe III et les facteurs utilisés y sont eux aussi détaillés. Les facteurs de réduction pour les gaz à effet de serre ne sont pas appliqués sur les émissions de GES issues du site sidérurgique car, pour celles-ci, le changement de technologie est directement effectif selon la technologie choisie. Par ailleurs, par

manque de données précises, aucune différenciation des facteurs de réductions n'est faite selon les secteurs d'activité.

L'évolution des technologies conduisant à la diminution des émissions pour les substances citées précédemment aura aussi un impact sur toutes les autres substances listées dans l'inventaire. Les émissions d'un procédé sont souvent reliées entre elles et en diminuer certaines conduit à une diminution générale des émissions. Pour toutes ces autres substances, une diminution linéaire de 50% entre les années 2000 et 2050 a été supposée dans les deux scénarios. Comme ces substances ne contribuent que très minoritairement aux impacts étudiés, ce choix n'a pas d'influence sur nos résultats. Cette hypothèse sera vérifiée dans la partie 6.3.2 présentant les résultats de cette partie.

La Figure 6-1 présente l'application des facteurs de réduction utilisés pour le scénario de référence (en pointillés) aux émissions à l'échelle de l'UE présentées dans la Figure 3-1 (en traits pleins).

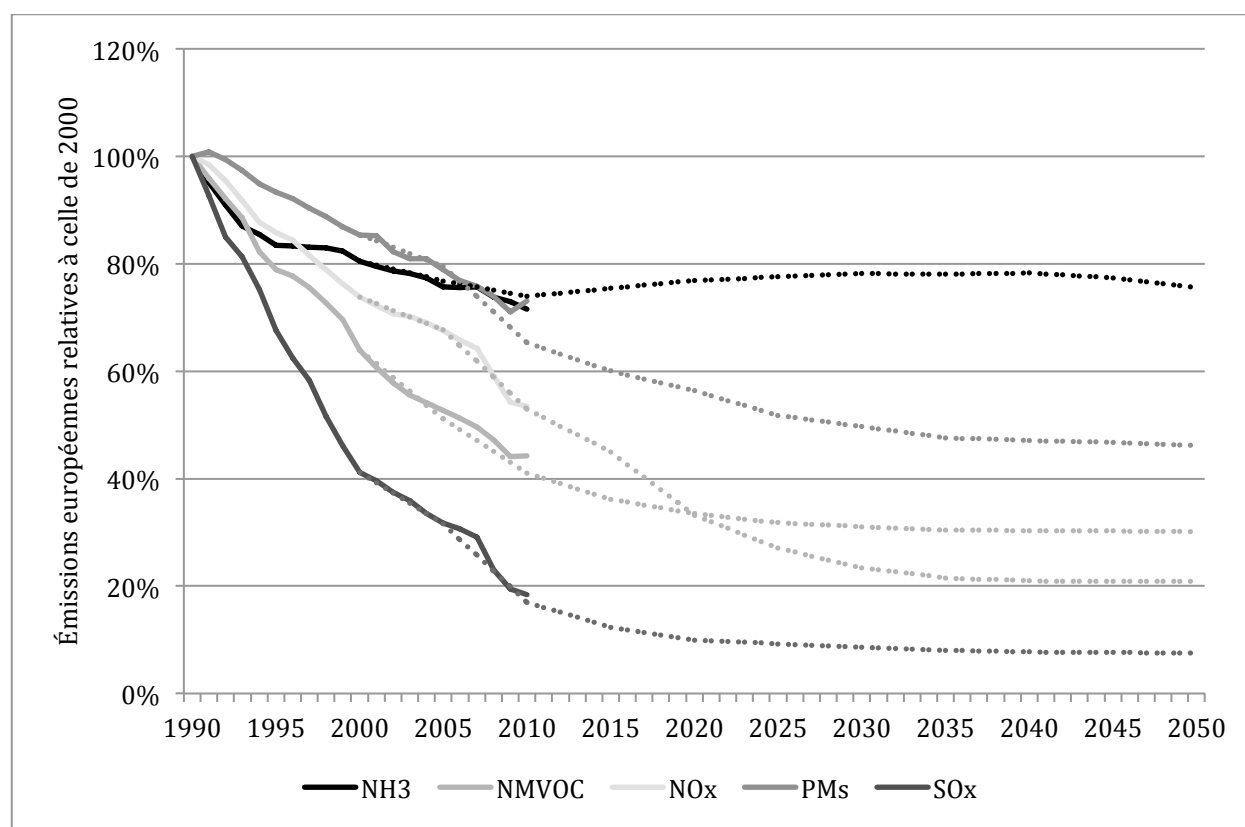


Figure 6-1 : Comparaison des émissions européennes réelles (traits pleins) et des objectifs de réduction (pointillés)

On observe que pour ces cinq catégories d'émissions, les émissions entre les années 2000 et 2010 coïncident avec les objectifs de réduction puis, pour les années suivantes, la tendance d'une diminution des émissions continue (sauf pour les émissions d'ammoniac). Cette comparaison montre que les objectifs utilisés semblent réalistes et atteignables.

### 6.2.3 Influence de la variation des objectifs de réduction avec les secteurs

Les objectifs présentés dans la Figure 6-6 sont les objectifs totaux, c'est-à-dire ceux correspondant à la moyenne des émissions sur tous les secteurs d'activité. Néanmoins, nous avons vu que les facteurs varient grandement entre les secteurs d'activité. Pour tester l'influence de cette différenciation des facteurs de réduction selon les secteurs d'activité, différentes options dans l'application des facteurs sont comparées dans les résultats :

- Option 1 : le même facteur correspondant à l'objectif de réduction total est appliqué à toutes les données de l'inventaire;
- Option 2 : l'inventaire est séparé en six grandes catégories (telles que définies pour l'analyse de contribution) qui sont l'acquisition des matières premières, le transport, le site, l'électricité, les déchets et les coproduits. Les objectifs de réduction sont adaptés en choisissant le secteur le plus représentatif de chaque catégorie. Le Tableau 6-3 illustre les hypothèses posées;

Tableau 6-3 : Secteurs SNAP associés aux catégories de l'inventaire dans l'option 2

Catégorie de l'inventaire	catégorie SNAP associée
Matières premières	4 - Procédés de production
Transport	7 - Transport routier
Site	4 - Procédés de production
Électricité	1 - Combustion dans les secteurs de l'énergie et des industries de la transformation
Déchets	9 - Traitement et disposition des déchets
Coproduits	4 - Procédés de production

- Option 2 bis : la démarche est similaire à celle de l'option 2 mais la catégorie transport est assimilée aux autres types de transport plutôt qu'au transport sur route;

Tableau 6-4 : Secteurs SNAP associés aux catégories de l'inventaire dans l'option 2 bis

Catégorie de l'inventaire	catégorie SNAP associée
Matières premières	4 - Procédés de production
Transport	8 - Autres sources mobiles et machines
Site	4 - Procédés de production
Électricité	1 - Combustion dans les secteurs de l'énergie et des industries de la transformation
Déchets	9 - Traitement et disposition des déchets
Coproduits	4 - Procédés de production

- Option 3 : Les objectifs de réduction sont choisis un par un pour chaque processus du système en fonction du secteur auquel ils sont associés.

Tableau 6-5 : Secteurs SNAP associés aux catégories de l'inventaire dans l'option 3

Catégorie de l'inventaire	Indice SNAP associé
Production des matières premières non fossiles	4
Extraction des matières premières fossiles (charbon, pétrole, gaz)	5
Transformation des matières premières fossiles	1
Transport par route	7
Transport par pipeline	5
Autres modes de transports	8
Production d'électricité	1
Déchets	9
Émissions du site - cokerie/agglomération	3
Émissions du site - haut fourneau	4
Autres émissions du site	4

### 6.3 Résultats de l'application des facteurs de réduction

Ce paragraphe présente l'influence de l'utilisation de facteurs de réduction sur l'analyse. Dans un premier temps, les différentes options sont testées sur les deux filières représentatives de l'étude (la filière de référence et la filière G). Les résultats sont ensuite présentés pour toutes les technologies étudiées.

### **6.3.1 Influence des différentes options sur les résultats**

Les différentes options présentées dans le paragraphe 6.2.3 ont été appliquées dans les deux filières représentatives de l'étude. Elles permettent de visualiser l'influence de la variation des facteurs de réduction selon les secteurs d'activité. Les résultats sont présentés ici pour le scénario de référence mais les tendances sont identiques dans le scénario alternatif. La comparaison de ces deux scénarios est effectuée par la suite. Les graphiques présentant la même allure pour les catégories acidification, eutrophisation et création d'ozone photochimique, une seule catégorie est présentée pour chaque filière dans les figures suivantes. Les autres graphiques sont disponibles en Annexe IV. Par ailleurs, pour la catégorie changement climatique, les facteurs de réduction sont identiques pour toutes les catégories. Les résultats sont donc identiques pour toutes les options. Ils ne sont pas présentés dans les figures suivantes mais sont disponibles en Annexe IV.

Les facteurs de réduction étant seulement appliqués sur la partie de l'inventaire correspondant aux émissions à l'environnement, ils ne changent pas les impacts calculés pour la catégorie de l'utilisation des ressources. Cet impact ne considère en effet que des flux entrants dans le système et récoltés lors de la phase d'ICV. Les résultats de cette partie ne sont donc pas reportés pour cette catégorie d'impact. Ce point sera discuté dans le chapitre 8.



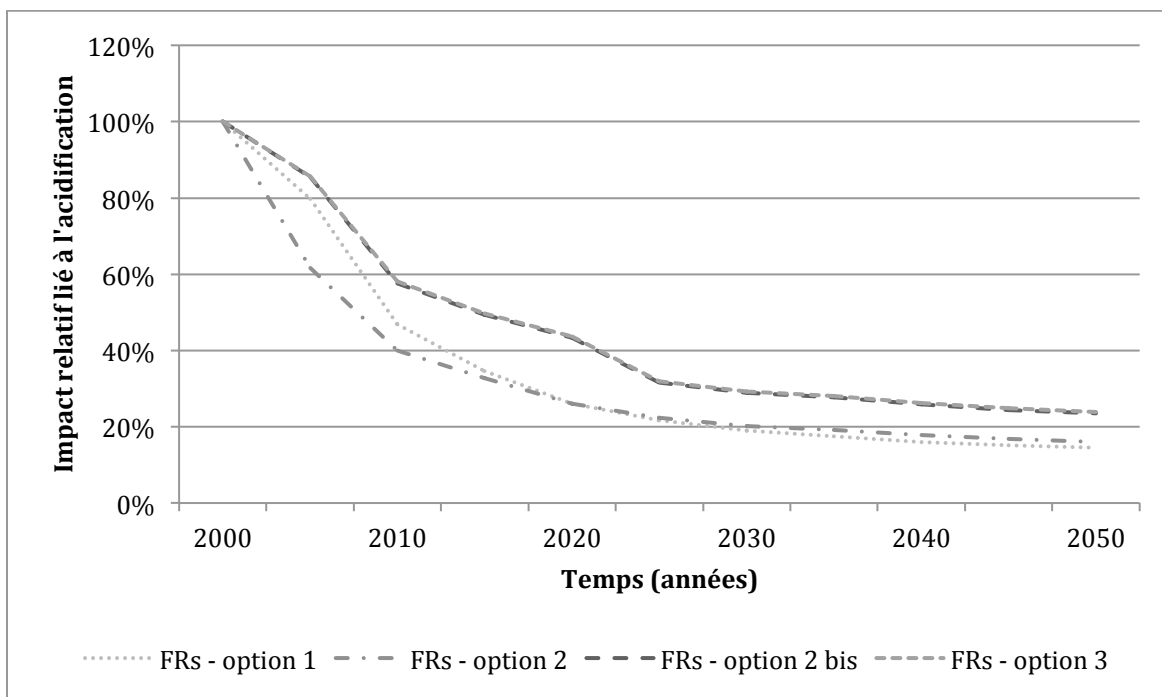


Figure 6-2 : Impact relatif lié à l'acidification pour la filière de référence (scénario de référence)

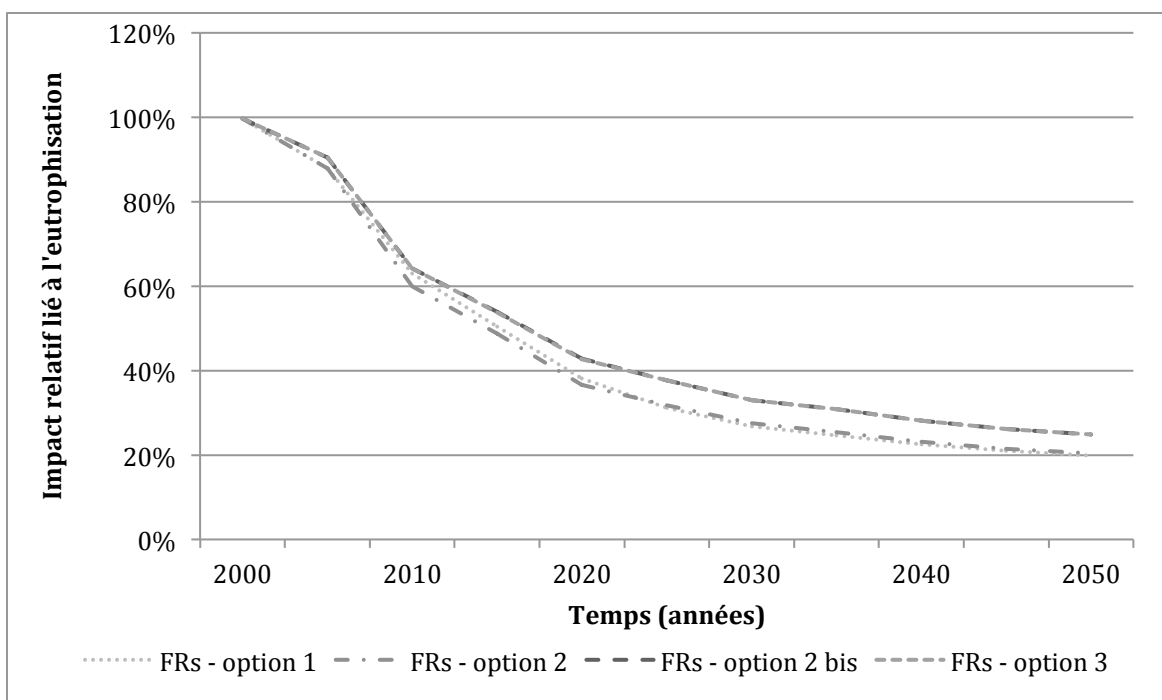


Figure 6-3 : Impact relatif lié à l'eutrophisation pour la filière G (scénario de référence)

Ces graphiques montrent une légère différence dans les résultats selon l'option utilisée pour appliquer les facteurs de réduction. Les résultats des options 1 et 2 sont très proches, et il en est de même pour les options 2 bis et 3. Ainsi, l'application d'un facteur de réduction total (option 1) conduit à des résultats peu différents de celle de facteurs différents sur les grandes catégories de l'inventaire, avec le transport assimilé au transport routier (option 2). Par contre, en assimilant le transport aux autres types de transport, les résultats sont très similaires à ceux obtenus en utilisant un facteur individuel sur chaque émission dépendamment de son secteur d'origine. Ce résultat s'explique par le fait que la grande majorité des impacts du transport proviennent du transport maritime ou ferroviaire. L'utilisation d'un facteur associé à ces modes de transport est donc plus pertinente pour représenter cette catégorie de l'inventaire.

En outre, la très faible différence entre les courbes représentant les options 2 bis et 3 montre que si les facteurs sont bien choisis pour représenter les catégories de l'inventaire, il n'est pas forcément utile de raffiner l'analyse en utilisant des facteurs différents pour chaque processus. En l'absence de données ou d'analyse de contribution précise, il est préférable d'utiliser des facteurs de réduction individuels pour chaque processus selon le secteur associé. La variation entre les options 2 et 2 bis montre qu'un seul choix approximatif peut influencer sur les résultats.

Il est par ailleurs nécessaire de considérer l'incertitude dans une telle étude. Les facteurs de réduction utilisés sont basés sur des données assez générales dont la pertinence sera discutée dans le chapitre 8. Les quatre courbes présentent globalement une allure très similaire, indépendamment de l'option choisie. L'objectif en utilisant ces facteurs de réduction n'est pas de représenter précisément l'influence de l'évolution technologique sur les résultats initiaux mais plutôt de visualiser une tendance plus globale. Dans cette optique, le choix de facteurs de réduction totaux pour chaque substance peut suffire et les spécifications des facteurs de réduction par secteur d'origine de l'émission, même si elles apportent une plus grande précision, ne sont pas forcément toujours utilisées. Cette approche sera néanmoins conservée dans la suite des résultats.

### **6.3.2 Influence de la prise en compte des autres substances**

Dans les résultats précédents, un objectif de réduction linéaire de 50% est appliqué entre les années 2000 et 2050 aux substances pour lesquelles aucun objectif précis n'a été fixé. Pour

tester l'influence de ce choix méthodologique, les calculs ont été effectués sans l'application du facteur de réduction à ces autres substances. Les résultats des Tableaux 6-6 montrent la comparaison de la diminution des impacts relatifs (par rapport à ceux de la filière de référence à l'année 2000) pour la filière de référence et avec les facteurs de réduction du scénario de référence, avec et sans l'application de ce facteur supplémentaire.

Tableau 6-6 : Diminution des impacts relatifs pour la filière de référence (scénario de référence)

Facteur de réduction sur les substances non prioritaires	Diminution des impacts relatifs pour la filière de référence					
	Acidification			Eutrophisation		
	2010	2030	2050	2010	2030	2050
Avec	58,0%	29,3%	23,9%	72,5%	36,5%	27,8%
Sans	58,3%	29,8%	24,6%	73,6%	38,2%	30,1%

Facteur de réduction sur les substances non prioritaires	Diminution des impacts relatifs pour la filière de référence					
	Changement climatique			Création d'ozone photochimique		
	2010	2030	2050	2010	2030	2050
Avec	94,9%	89,0%	85,3%	68,3%	40,9%	27,9%
Sans	94,9%	89,1%	85,3%	68,3%	40,9%	27,9%

Dans les quatre catégories d'impacts considérées, la variation des résultats entre les deux hypothèses est très petite. Les conclusions sont les mêmes sur toutes les autres filières à l'étude. Ce résultat montre la très faible influence de cette hypothèse sur la variation des impacts étudiés. Pour la suite de l'étude, le facteur de réduction est donc conservé sur ces autres substances, même si son influence est négligeable.

### 6.3.3 Influence de l'application des facteurs de réduction sur l'inventaire

Les facteurs de réduction dépendants du secteur d'origine des émissions (option 3) sont appliqués à toutes les filières à l'étude. Les résultats sont présentés dans les figures ci-dessous pour les catégories changement climatique et acidification. Pour les catégories eutrophisation et création d'ozone photochimique, l'influence est identique à celle pour l'acidification et les

graphiques correspondants sont présentés en Annexe IV. Les graphiques représentent les impacts relatifs (par rapport à ceux de la filière de référence à l'année 2000) pour toutes les filières à l'année 2050 dans les deux scénarios étudiés.

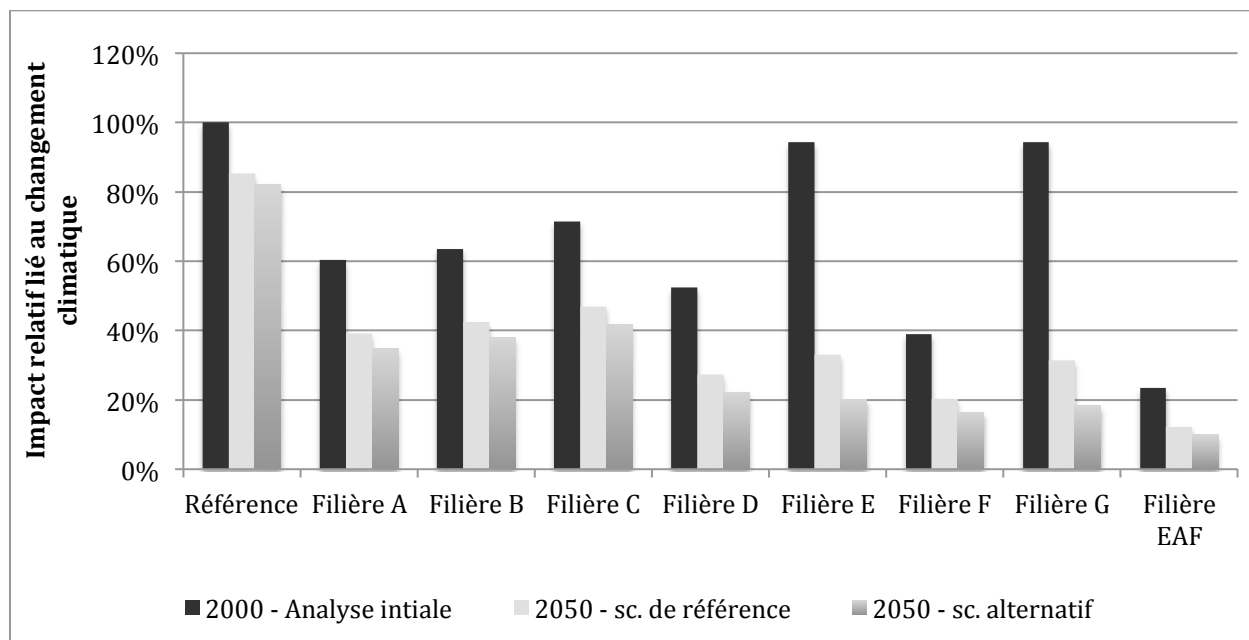


Figure 6-4 : Comparaison des facteurs de réduction – catégorie changement climatique

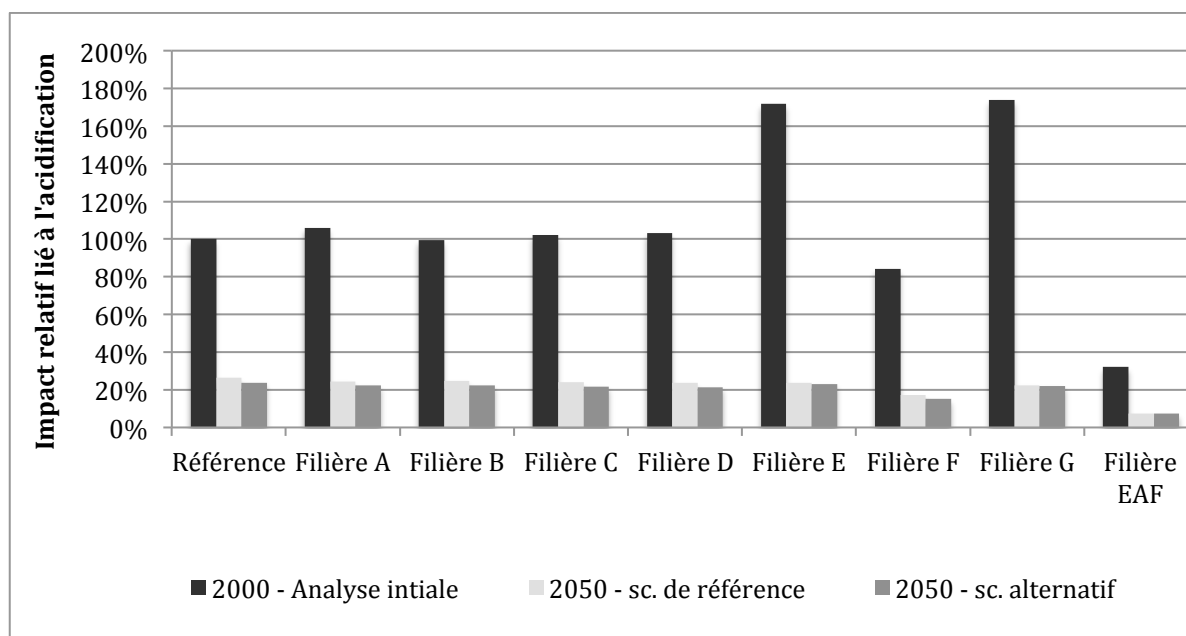


Figure 6-5 : Comparaison des facteurs de réduction – catégorie acidification

D'un point de vue général, ces figures montrent l'influence non négligeable des facteurs de réduction sur les filières étudiées. Dans toutes les catégories, les impacts sont diminués de manière significative entre les années 2000 et 2050. Pour la catégorie changement climatique, les impacts sont moins influencés par l'application des facteurs de réduction que pour les autres catégories car les émissions de gaz à effet de serre du site, qui contribuent majoritairement à l'impact changement climatique, ne sont pas affectées par les facteurs de réduction. Les filières E et G, pour lesquelles les émissions de GES proviennent plus de l'électricité que du site, sont les plus marquées par les facteurs de réduction dans cette catégorie. Dans les autres catégories, les facteurs de réduction ont une très grande influence. Les impacts sont diminués de près de 80% dans la plupart des catégories.

Dans la catégorie changement climatique, la différence d'impacts des facteurs entre les deux scénarios est visible. Les objectifs de réduction appliqués étant plus élevés pour le scénario alternatif, les impacts sont diminués de manière plus importante dans ce scénario. Pour les autres catégories, les facteurs étant plus proches dans les deux scénarios considérés, la différence d'impacts entre les scénarios est relativement moins importante.

## CHAPITRE 7 SYNTHÈSE DES RÉSULTATS DE L'ÉTUDE PROSPECTIVE

### 7.1 Comparaison des différents aspects prospectifs

Les deux aspects temporels considérés comme influant sur les résultats de l'étude initiale sont la variation de l'électricité et l'utilisation des facteurs de réduction, en considérant les différences entre les deux scénarios étudiés. Ces deux facteurs sont donc appliqués séparément puis simultanément aux différentes filières à l'étude pour en comparer les influences. Les figures ci-dessous présentent, pour le scénario de référence, les résultats à l'année 2050 pour les catégories changement climatique et acidification, dont les conclusions sont semblables à celles pour les catégories d'impacts eutrophisation et création d'ozone photochimique. Les résultats sont présentés pour chaque filière en impacts relatifs par rapport aux impacts calculés dans l'ACV initiale pour la même filière (et non par rapport à la filière de référence comme précédemment).

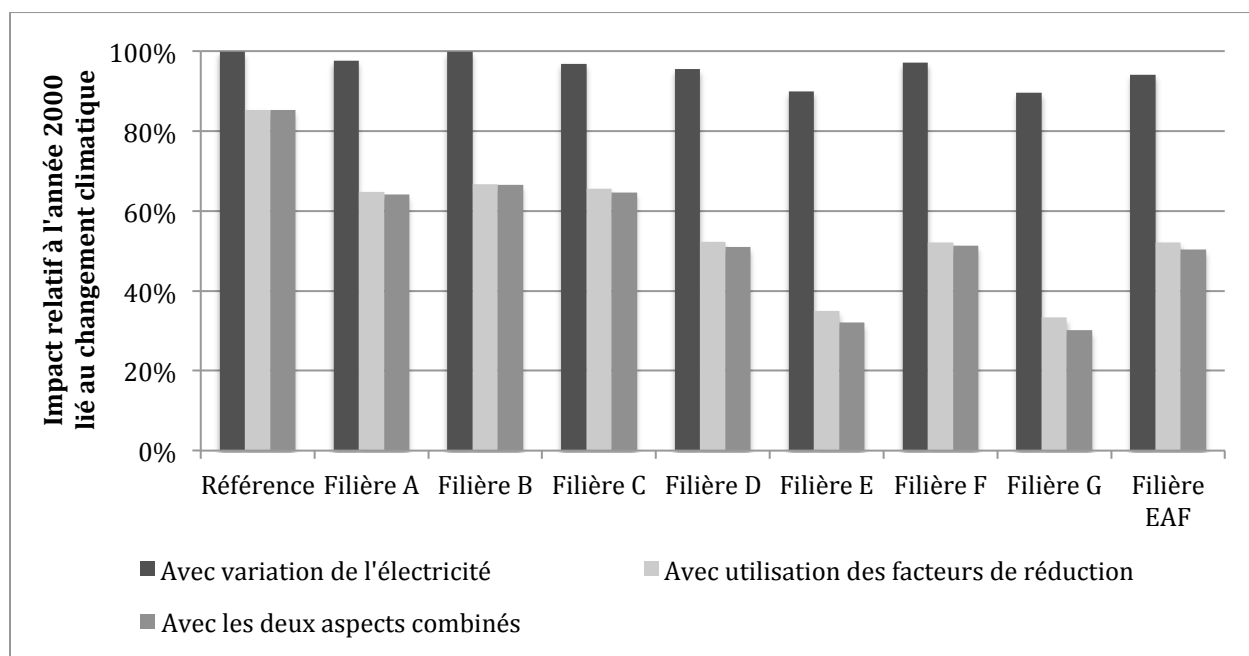


Figure 7-1 : Influence des facteurs prospectifs - catégorie changement climatique (sc. de référence, année 2050)

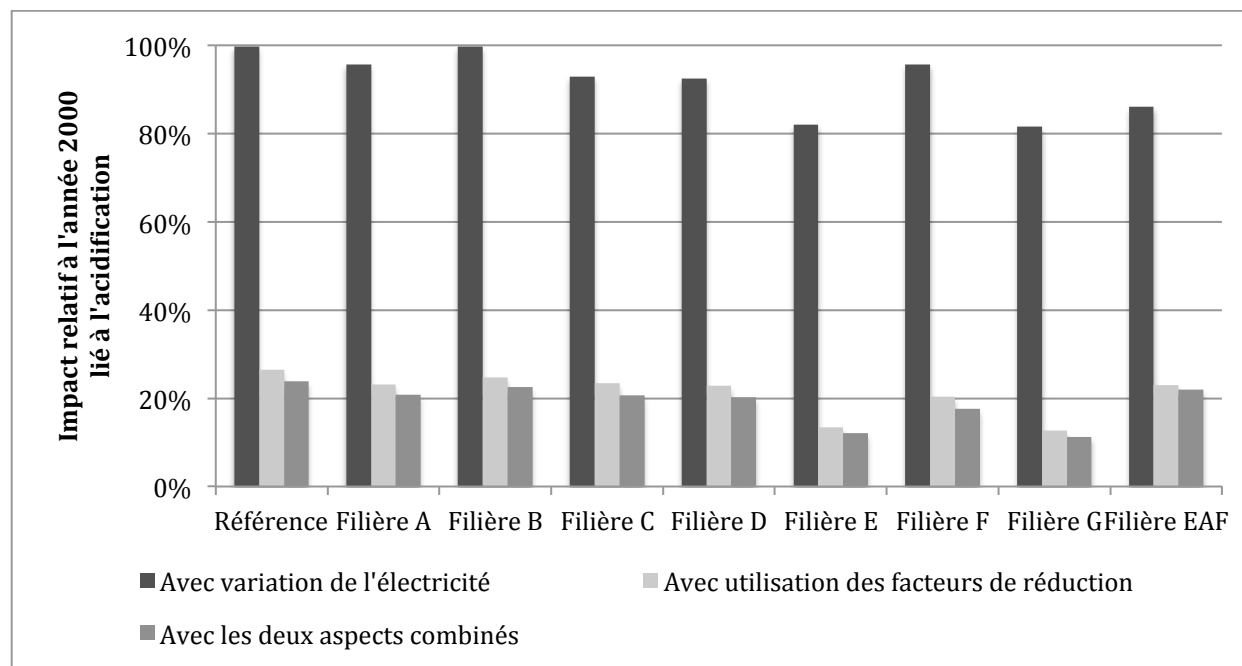


Figure 7-2 : Influence des facteurs prospectifs – catégorie acidification  
(sc. alternatif, année 2050)

Ces deux graphiques montrent le rôle prédominant des facteurs de réduction sur l'étude prospective menée dans ce chapitre. Dans les quatre catégories d'impacts liées à la partie des émissions dans l'inventaire, les résultats sont presque identiques avec l'utilisation seule des facteurs de réduction ou avec l'utilisation combinée de la variation de l'électricité et des facteurs de réduction. L'hypothèse d'utiliser ces facteurs de réduction est donc très importante et tend à surpasser les autres aspects prospectifs.

## 7.2 Comparaison des filières à l'an 2050

Les Figures 7-3 et 7-4 présentent la comparaison des filières étudiées à l'an 2050, en appliquant les deux aspects prospectifs simultanément. Les résultats sont présentés sous la forme d'impacts relatifs par rapport à ceux de la filière de référence à l'an 2000.

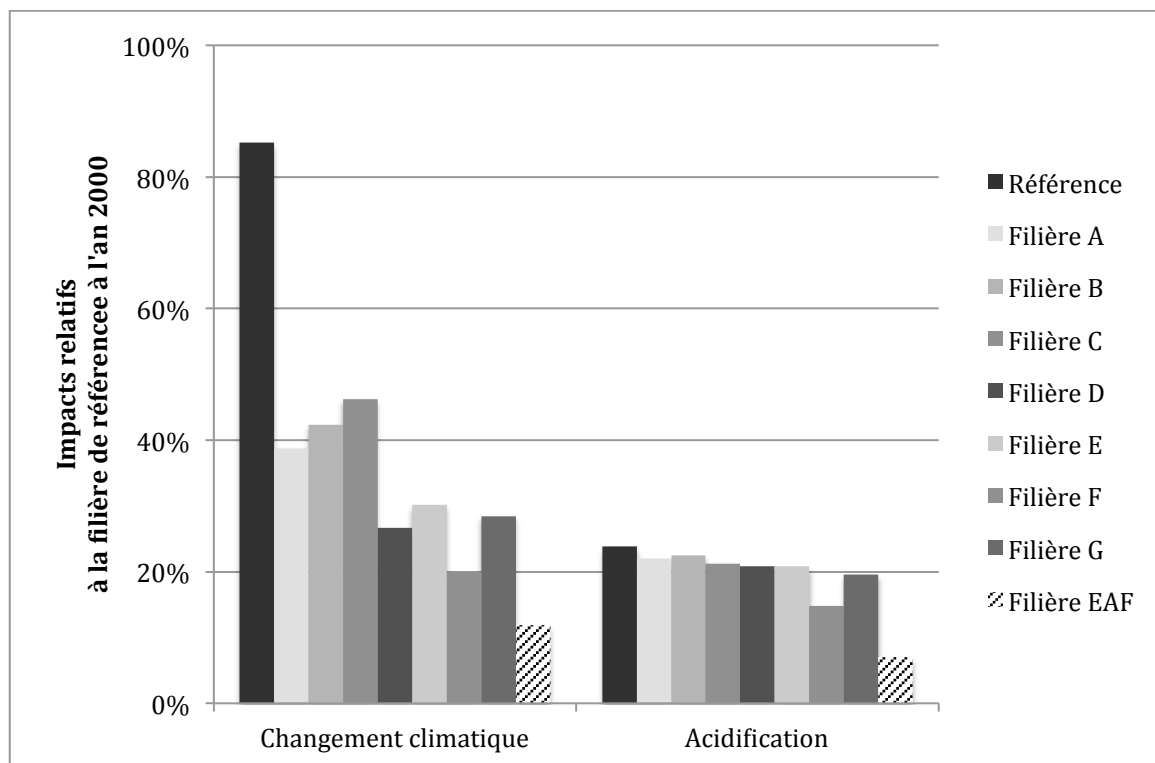


Figure 7-3 : Impacts relatifs des différentes filières à l'an 2050 (scénario de référence)

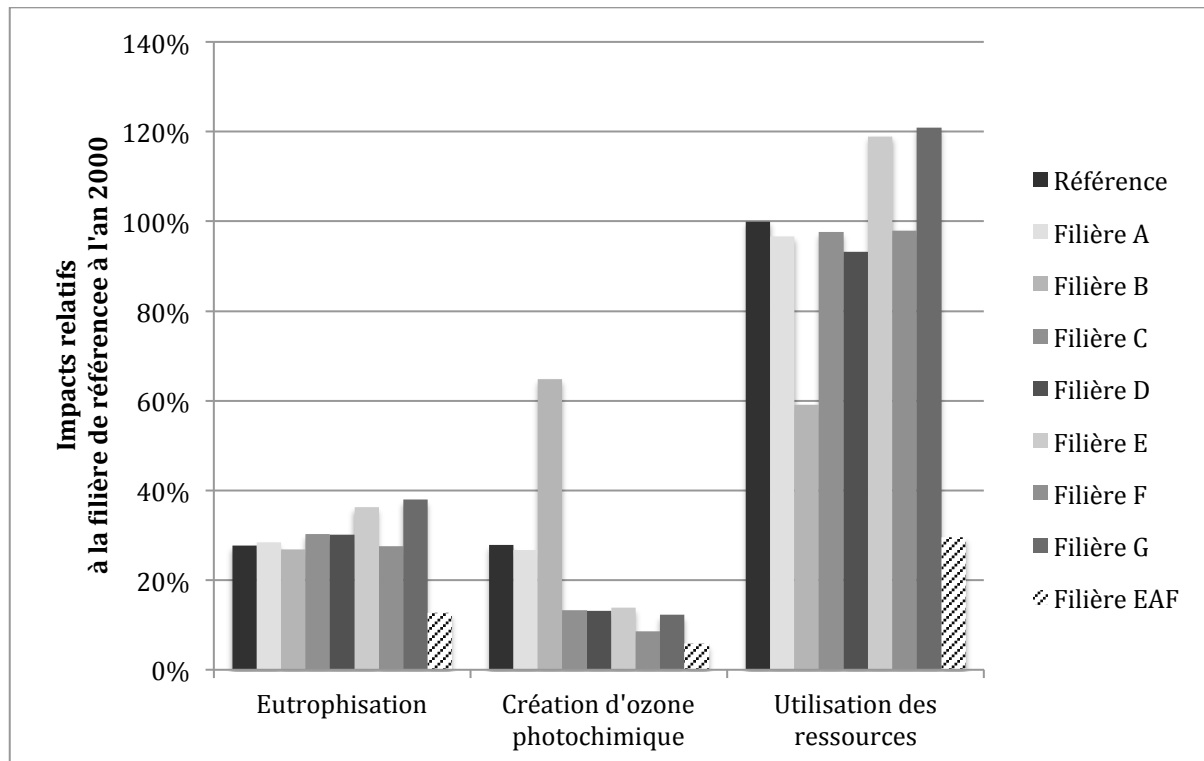


Figure 7-4 : Impacts relatifs des différentes filières à l'an 2050 (scénario de référence), suite



En comparaison des impacts de la filière de référence calculés pour l'année 2000, toutes les filières ont un impact largement inférieur en 2050 pour les quatre catégories liées aux émissions. Cette importante diminution des impacts est en grande majorité imputable aux objectifs de réduction appliqués sur les données initiales. Le cas de la catégorie de l'utilisation des ressources est spécifique car seule la variation du mix électrique en modifie légèrement les valeurs. Les deux filières par électrolyse restent cependant encore supérieures pour cette catégorie.

### **7.3 Impacts associés à la production totale d'acier**

L'analyse prospective présentée précédemment dans cette partie permet de calculer l'évolution potentielle des impacts futurs associés à l'industrie sidérurgique dans son ensemble. Pour ce faire, la quantité d'acier produite selon chaque technologie est multipliée par l'impact associé à cette technologie dans la catégorie considérée. Les impacts sont présentés en traits pleins dans les figures suivantes, relativement à l'impact total initial (100% pour l'année 2000). L'évolution projetée de la production d'acier est aussi reportée sur les graphiques par des traits discontinus. Comme précédemment, seules les catégories acidification et changement climatique sont présentées ci-dessous, mais les graphiques pour les autres catégories sont disponibles à l'Annexe V. Ces figures permettent de comparer les deux scénarios à l'étude et de visualiser la différence entre l'évolution de la production d'acier et celle des impacts associés.

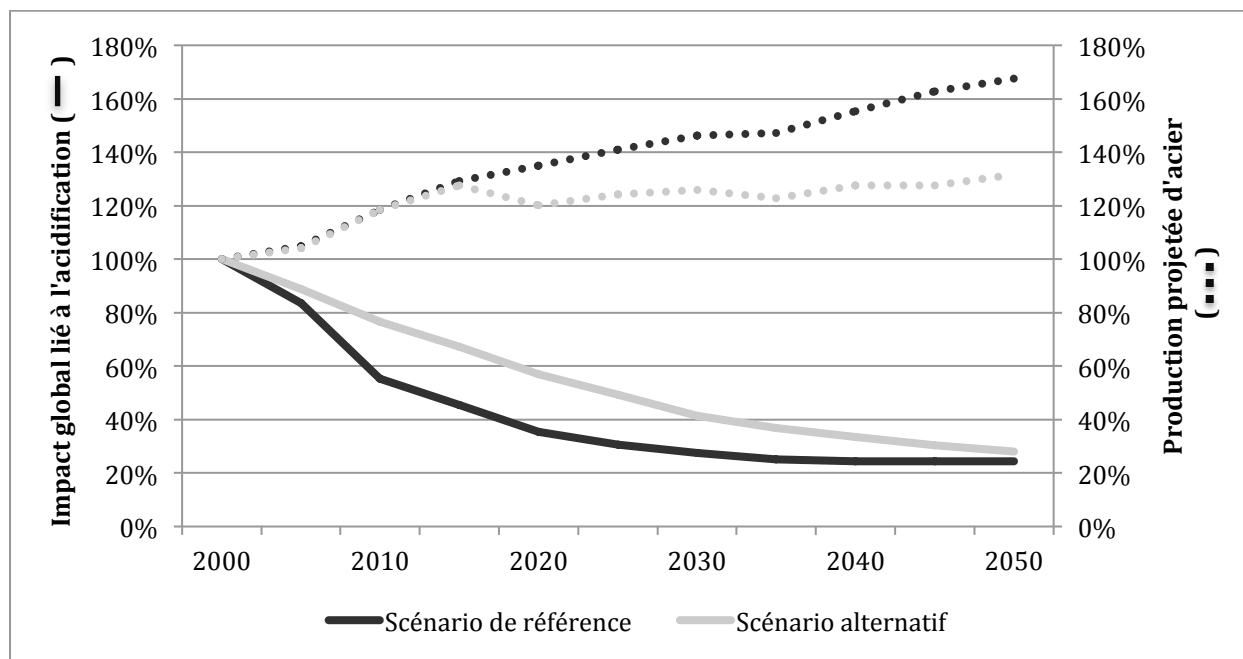


Figure 7-5 : Évolution des impacts liés à la production totale d'acier - catégorie acidification

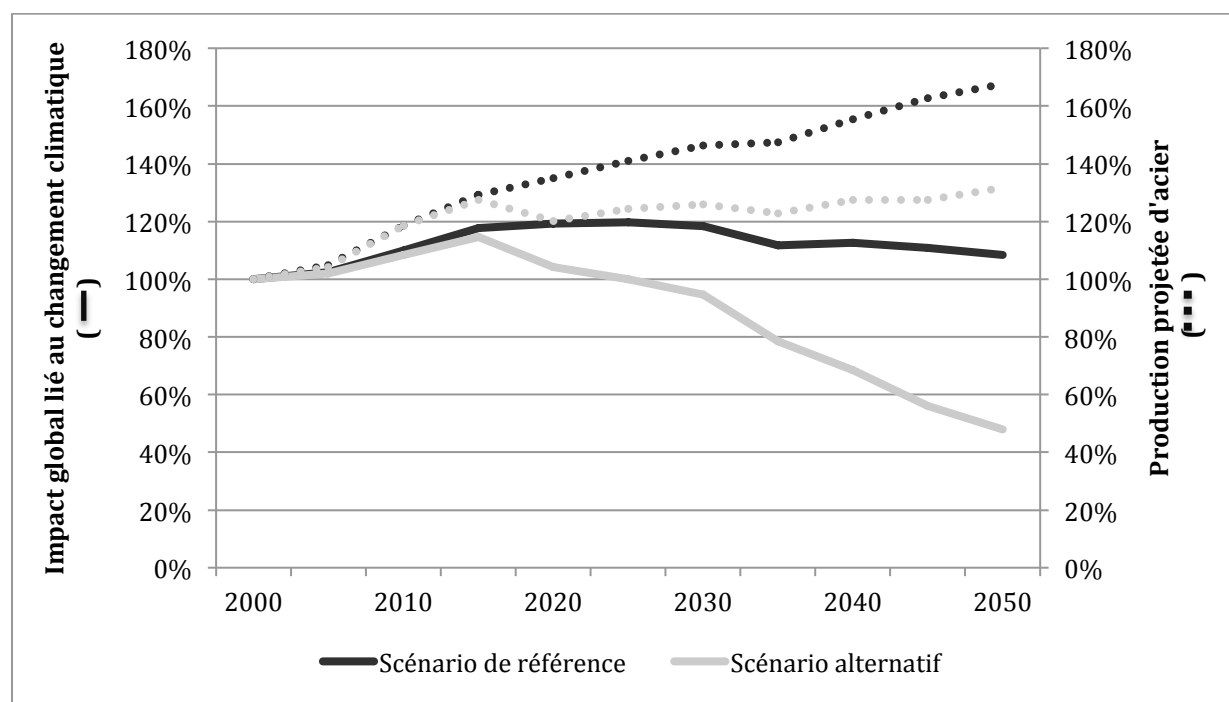


Figure 7-6 : Évolution des impacts liés à la production totale d'acier - catégorie changement climatique

On observe pour la catégorie changement climatique une augmentation initiale des émissions totales associées à la production d'acier. Dans ce premier temps, la quantité d'acier

produite à l'échelle de l'Europe augmente et les nouvelles technologies ne sont pas encore apparues, ce qui explique cette évolution. On observe ensuite une stabilisation des émissions totales puis une légère diminution pour le scénario de référence. Le ralentissement de la production et l'apparition de certaines nouvelles technologies permettent cette légère amélioration. Dans le scénario alternatif, les impacts globaux dans cette catégorie diminuent à partir de 2015, grâce aux effets combinés de l'introduction plus importante de nouvelles technologies, d'une évolution plus rapide du mix électrique vers une électricité à faible GES et d'objectifs de réductions plus importants pour ce scénario. Une politique efficace en matière de diminution des gaz à effet de serre aurait donc un impact significatif les émissions de GES associées à la sidérurgie.

Dans la catégorie acidification, la diminution des impacts attribuables au cycle de vie de la production d'acier est supérieure à 70% en 2050, par rapport à ceux calculés pour l'année 2000. On observe cependant un phénomène assez remarquable : les impacts totaux sont plus faibles dans le scénario de référence que dans le scénario alternatif (alors que c'est l'inverse pour le changement climatique). Ce résultat s'explique par l'introduction plus rapide des nouvelles technologies en remplacement de la filière de référence alors que certaines ont dans cette catégorie des impacts initiaux supérieurs à cette filière. Si aucun effort n'est accordé sur cet aspect dans le développement des technologies et que ces technologies sont effectives trop rapidement, on peut donc observer un déplacement d'impacts du changement climatique vers les autres catégories.

Par ailleurs, les impacts peuvent aussi être calculés pour une tonne d'acier « moyenne », dont la composition correspond au mix technologique de la production. Les impacts associés à la production totale d'acier sont alors tout simplement divisés par la quantité d'acier produite. Le graphique suivant représente les impacts de la catégorie changement climatique associés à la production de cette tonne « moyenne » d'acier. Les résultats pour les autres catégories d'impacts sont disponibles en Annexe V et les conclusions sont globalement les mêmes que pour l'évolution de la production globale d'acier à l'échelle européenne.

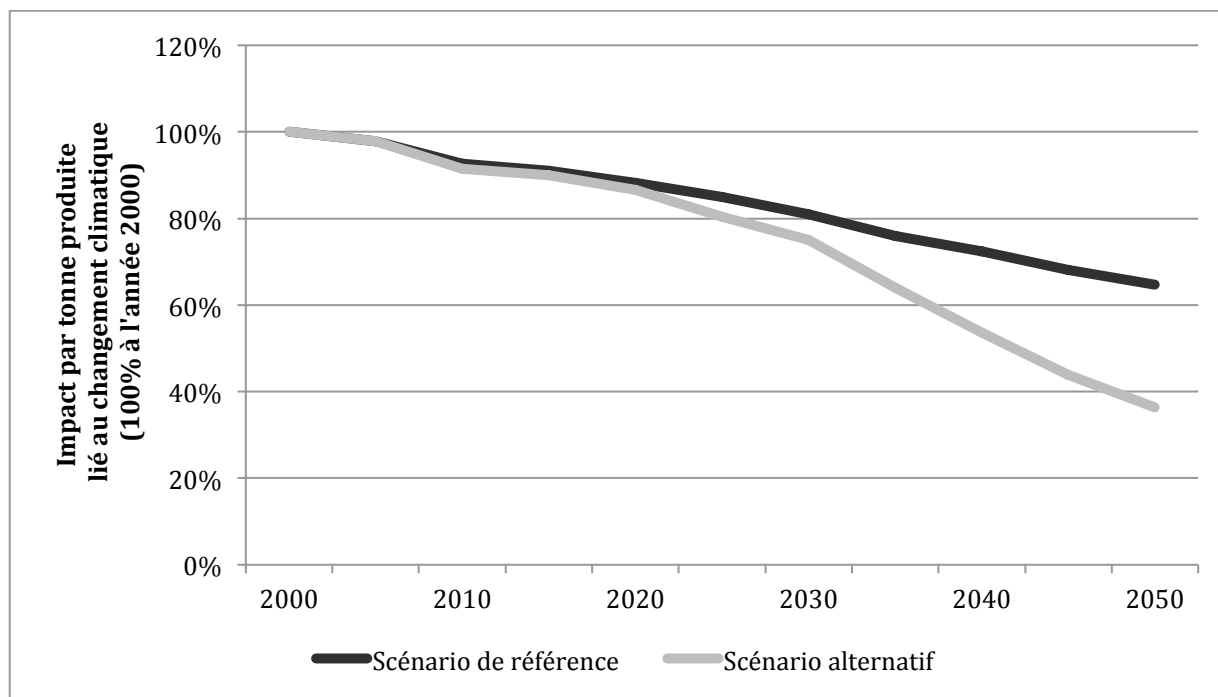


Figure 7-7 : Évolution des impacts associés à la production d'une tonne d'acier dans la catégorie changement climatique

La prise en compte de l'implantation des nouvelles technologies de production d'acier et des aspects prospectifs développés dans ce chapitre conduit à une diminution comprise dépendamment du scénario entre 35% et 64% pour les impacts sur le changement climatique associés à la production d'une tonne d'acier. Les technologies étudiées étant développées dans cette optique, les résultats sont concluants.

## **CHAPITRE 8 DISCUSSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS**

Ce chapitre propose de revenir sur le travail effectué tout au long de ce projet pour en souligner certains points. Dans un premier temps, la discussion portera sur l'approche d'ACV-P utilisée, puis sur l'étude de cas et les perspectives d'application des résultats de l'étude. Des recommandations en lien avec l'étude de cas et la méthodologie développée pour tenir compte de l'évolution des politiques environnementales sont ensuite développées.

### **8.1 Discussion des résultats**

#### **8.1.1 L'analyse du cycle de vie prospective**

##### **8.1.1.1 Une utilisation hors contexte de la notion de prospective**

La démarche prospective développée dans ce mémoire et appliquée à l'analyse du cycle de vie diffère de la notion générale de prospective telle qu'elle est présentée dans le paragraphe 1.2.1. Notre approche regroupe à la fois des aspects prospectifs et prédictifs, sans en faire la distinction. Cette remarque n'est pas limitée à la seule étude menée dans ce projet. D'un point de vue plus général, le terme « prospectif » est utilisé en analyse du cycle de vie sans faire spécialement la différence entre prospective et prédiction. Cette utilisation hors contexte initial d'un terme est par ailleurs un reproche parfois formulé à l'analyse du cycle de vie car elle peut conduire à des incompréhensions ou imprécisions.

L'approche prospective de ce mémoire est essentiellement basée sur l'utilisation de scénarios prospectifs (que ce soit pour la production d'acier, le mix électrique ou l'évolution des politiques environnementales). Cette méthode est couramment utilisée pour les études du futur. Bien que ce terme réfère normalement à une représentation de plusieurs visions contrastées du futur (De Jouvenel, 2004), comme c'est le cas pour les travaux du MEA évoqués dans la partie 1.2.1, il est aussi souvent employé, tel que dans ce mémoire, pour désigner des variations légères d'une projection de base, appelée « business as usual ». Même si cette approche est plus prédictive que prospective, elle permet de comparer les effets de certaines actions à un cas de

référence représentant un futur où les tendances actuelles sont inchangées. Outre cette différence entre approches prédictives et prospectives, Börgeson et al (2006) distinguent deux autres grandes catégories de scénarios : une exploratoire qui se demande ce qui pourrait arriver et une normative qui recherche les moyens nécessaires pour atteindre une cible future spécifique. Dans les analyses environnementales, les scénarios sont utiles car ils permettent de prévoir à la fois les impacts des problèmes actuels et l'apparition de nouveaux problèmes dans le futur (Alcamo, 2001). Pour l'étude de cas de ce projet, l'utilisation de scénarios correspond à une approche exploratoire. Elle vise à situer la place des nouvelles technologies étudiées dans deux différentes visions du futur et à comparer ces deux prévisions.

### **8.1.1.2 Lien entre ACV prospective et ACV dynamique**

L'analyse du cycle de vie prospective et l'analyse du cycle de vie dynamique, explicitée dans le paragraphe 1.1.4.1., sont toutes les deux des approches récentes proposant des solutions à une problématique temporelle en ACV. Il semblerait donc intéressant de coupler ces deux approches pour proposer une méthode globale de résolution de cette problématique. Cette démarche n'est cependant pas forcément pertinente car les deux problèmes temporels résolus par ces deux types d'ACV ne sont pas forcément liés. Dans ce mémoire, le cycle de vie étudié (la production d'acier) a lieu sur un court intervalle de temps, alors que l'étude prospective a lieu sur plusieurs décennies. Une désagrégation temporelle des données d'inventaire n'apporterait que peu de détails supplémentaires à l'analyse. L'utilisation de facteur dynamique est pertinente quand le cycle de vie étudié s'étale sur une longue période, auquel cas les impacts causés par les émissions du début et de la fin du cycle de vie ne sont pas forcément équivalents à un horizon de temps fixé. L'ACV dynamique n'apporterait donc pas d'amélioration significative à cette étude. Par contre, l'ACV prospective de cette étude peut être une base pour des études se basant sur les principes de l'ACV dynamique. En désagrégeant les émissions en fonction du temps sur un long cycle de vie, il est possible de différencier les données entre deux instants. Ainsi, l'utilisation de données prospectives telles que celles de cette étude permettrait d'associer des émissions différentes entre de l'acier utilisé au début du cycle de vie d'un produit et de l'acier utilisé à un horizon de temps plus éloigné. Même si l'ACV dynamique n'est pas forcément utile à l'ACV-P, cette dernière peut en revanche servir à modéliser des données influentes dans une ACV réalisée d'une manière dynamique.

### 8.1.1.3 La méthodologie d'analyse du cycle de vie prospective

La méthodologie présentée dans le chapitre 3 a été testée avec succès sur l'étude de cas. Quelques enseignements ont été identifiés en vue de la généralisation de l'application de cette démarche prospective.

Dans un premier temps, la variation du mix électrique a une influence non négligeable sur les résultats. Plus généralement, l'évolution des impacts du mix électrique montre que les résultats peuvent évoluer de façon importante sur un intervalle de temps assez long. Cette variation est donc un paramètre majeur à prendre en considération dans les études prospectives, surtout si l'utilisation d'électricité est un contributeur important dans au moins une des catégories d'impact étudiées. Cette influence de l'électricité sur les résultats confirme une conclusion souvent montrée en analyse du cycle de vie qui est la dépendance des résultats au mix électrique utilisé (Frischknecht, Büsser, & Krewitt, 2009).

Dans un second temps, l'utilisation de facteurs de réduction pour modéliser l'influence des futures politiques environnementales a montré une grande influence de cette modélisation sur les résultats de l'étude. Ce facteur est donc prédominant dans l'évolution prospective d'une analyse. Avec la méthode spécifique développée pour cette étude, un des objectifs spécifiques de ce mémoire est donc atteint. Les limitations et perspectives de développement de cette méthodologie sont développées dans la partie 8.3.

La méthode prospective développée pour modéliser l'évolution technologique, sous l'influence de futures politiques environnementales, présente une approche novatrice dans le domaine. Contrairement à l'exemple du projet NEEDS développée dans le paragraphe 1.2.4.3, notre approche ne se limite pas aux progrès technologiques actuels (les MTD) et englobe à la fois les données d'avant et d'arrière-plan. L'hypothèse que, si elles n'existent pas encore, les technologies pour atteindre une réglementation donnée vont apparaître, conduit à s'affranchir des données actuelles en matière d'émissions et ne pas se limiter à ce que l'on pense réalisable. Elle correspond à une conviction que l'Homme sera capable de s'adapter à un environnement plus contraignant.

## **8.1.2 Bilan sur l'étude de cas appliquée à la sidérurgie**

### **8.1.2.1 L'application d'une démarche prospective au cas d'étude**

Cette étude de cas sur la production d'acier a permis de toucher plusieurs aspects de l'analyse du cycle de vie prospective. Dans un premier temps, la difficulté à évaluer les données d'inventaire pour des technologies encore en phase de recherche et développement a été mise en évidence. Pour faire face à ce problème, plusieurs solutions ont été proposées et testées dans l'étude. Bien que ces méthodes présentent des approches différentes et originales, elles sont complémentaires pour aider à la collecte de données ou leur approximation au cas où elles n'existent pas encore. Les méthodes utilisées méritent d'être approfondies et il serait intéressant de comparer les résultats modélisés dans cette étude à des données de terrain réellement relevées dans le futur pour en tester la validité et les incertitudes associées.

Par ailleurs, une autre méthode est envisageable pour évaluer les données d'inventaire associées à des technologies en développement : la méthode par modélisation. Dans ce cas, les données sont issues de simulation informatique de procédés. En s'appuyant sur des relations physicochimiques, il est possible de simuler les réactions ayant lieu dans les procédés et d'en calculer toutes les émissions associées. Ce travail a déjà été effectué, dans le cadre du projet ULCOS, pour modéliser un site sidérurgique et pour servir à construire un inventaire des émissions associées (Iosif, Hanrot, & Ablitzer, 2008). L'application de ce travail à toutes les autres filières du projet UCLOS permettrait d'obtenir des données précises sur les inventaires associés mais les modélisations n'ont été effectuées, à ce jour, que pour la filière de référence.

En suivant la méthode développée, différents aspects prospectifs ont été considérés dans cette étude : la variation du mix électrique, l'évolution des transports et l'influence de futures politiques environnementales. L'ACV-A effectuée dans le chapitre 4 a permis d'identifier les deux premiers aspects comme des parties du système à considérer dans l'ACV-P puis plusieurs méthodes prospectives ont été proposées et appliquées pour représenter ces parties. L'utilisation de facteurs de réduction a ensuite permis de représenter l'influence des futures politiques environnementales sur les données d'inventaire. La cohérence entre ces différentes méthodes et leur pertinence ont été vérifiées au long de l'analyse.



Par ailleurs, l'utilisation des facteurs de réduction sur toutes les émissions, et pas seulement les données d'arrière-plan, témoigne une volonté de considérer le progrès possible dans tous les secteurs, et en premier la sidérurgie. Cet aspect est d'autant plus réaliste que les technologies étudiées sont actuellement en développement et ne représente donc pas forcément la même version que celle qui sera implémentée dans le futur. L'ACV-A du chapitre 4 a identifié des potentiels déplacements d'impacts dans certaines catégories. Une marge de manœuvre est existante et l'utilisation de facteurs de réduction sur les données d'avant plan permet de la modéliser. Les nouvelles technologies sont rarement définitives et sont sujettes à des améliorations au cours de leur vie, par exemple en terme d'efficacité.

Par rapport à l'ACV réalisée au début de projet ULCOS et présentée dans le paragraphe 1.3.5, les travaux effectués dans ce mémoire constituent une nette amélioration de l'étude. L'utilisation de données plus récentes et plus approfondies a permis de représenter de façon plus précise les différentes filières à l'étude et donc de diminuer l'incertitude sur les résultats. De plus, l'étude prospective menée est basée sur une méthodologie claire et sur des données futures plus complètes.

#### **8.1.2.2 Aspect conséquentiel et validité des données prospectives**

Par ailleurs, l'analyse du cycle de vie effectuée dans ce projet est basée sur une approche attributionnelle, c'est-à-dire qu'elle repose sur une simple description du système sans prendre en considération les effets du changement. Cette approche peut s'avérer limitante, en particulier par le fait que certaines technologies soient radicalement différentes de celle de référence. Par exemple, les filières par électrolyse nécessitent une importante consommation d'électricité produite en dehors du site sidérurgique. Cette importation d'électricité peut être source d'une modification importante du marché de l'électricité dans la région associée, en conduisant par exemple à la construction de nouvelles installations pour satisfaire cette demande. Une approche conséquentielle est donc nécessaire pour tenir compte de ce facteur, qui peut changer les résultats de l'analyse. Elle est partiellement mise en place avec l'utilisation du modèle d'équilibre partiel POLES pour le développement des scénarios prospectifs. Les variations de la demande énergétique conséquentes à l'utilisation des nouvelles technologies sont prises en compte dans la modélisation mais d'autres aspects restent ignorés. Par exemple, une augmentation de la production européenne d'acier va conduire à une hausse de l'importation de minerai et de la

demande en d'autres matières premières, dont les effets sur le marché global de ces matériaux ne sont pas identifiés dans l'étude.

Un autre aspect discutable dans cette étude est la validité des données prospectives utilisées. Les scénarios considérés se basent sur des modèles technico-économiques qui essayent de prévoir le mieux possible différentes visions du futur selon les contraintes associées. Il y a cependant très souvent des variations entre ce qui peut être prédit et ce qui se passe réellement. Le Tableau 8-1 compare la production européenne d'acier prévue entre les années 2000 et 2010 dans les deux scénarios considérés à l'évolution réelle de cette production d'après des données de la Worldsteel Association (2011).

Tableau 8-1 : Comparaison prévisions/réalité pour la production d'acier

<b>Production européenne (EU27) (Mt d'acier par an)</b>	<b>2000</b>	<b>2005</b>	<b>2010</b>	<b>Moyenne annuelle (2000-2010)</b>
Prévisions du scénario de référence	189	197	223	203
Prévisions du scénario alternatif	189	197,3	224,3	203,5
Données réelles	190,4	195,5	172,6	189,7

La différence entre les prévisions et les données réelles est faible pendant les premières années mais, en 2010, la production d'acier mesurée a chuté à cause de la crise économique de 2009. Ce facteur n'ayant pas été prévu dans les modèles, les résultats divergent à cet horizon de temps. L'utilisation de modèles prospectifs semble donc limitée avec de tels événements qui ne peuvent que difficilement être prévus longtemps à l'avance. Cependant, l'impact d'une telle crise peut être absorbé dans la modélisation à plus long terme. En comparant la moyenne de la production européenne d'acier entre 2000 et 2010 pour les prévisions ou la réalité, on constate que la différence est plus faible. Une fois la crise passée, la production va recommencer à croître et les prévisions du modèle sont applicables pour la suite de la période étudiée, avec un léger décalage dû à cet événement.

### 8.1.3 Perspectives d'utilisation des résultats

Les résultats de cette étude ont montré que pour les scénarios considérés, les impacts associés à la production d'acier vont diminuer dans les prochaines décennies sous l'influence de l'introduction de nouvelles technologies et de l'évolution des politiques environnementales. L'objectif initial du projet ULCOS de diminuer de 50% les émissions de gaz à effet de serre associée à la production d'acier est atteint par le scénario alternatif et le scénario de référence s'en approche (cf Figure 7-7). Il n'est donc pas idéaliste de penser qu'une réduction des émissions de gaz à effet de serre est possible par rapport aux émissions actuelles, même avec une augmentation de la production sur l'intervalle de temps étudiée.

Pour les autres catégories d'impacts étudiées, la prise en compte de l'impact de futures politiques environnementales sur les données de l'étude conduit aussi à une future diminution des impacts. Un résultat intéressant dans cette étude est la comparaison entre les deux scénarios qui montre qu'une plus grande baisse des impacts dans une catégorie (le changement climatique) peut se faire au détriment des autres catégories d'impacts si des précautions nécessaires ne sont pas prises. Ainsi, d'après notre étude, les impacts liés à l'acidification, l'eutrophisation et la création d'ozone photochimique diminuent moins rapidement dans le scénario alternatif (qui est plus contraignant d'un point de vue du changement climatique) que dans le scénario de référence. La limitation plus forte des émissions de gaz à effet de serre conduit donc à un léger déplacement des impacts vers d'autres catégories. Ce facteur est dû à l'utilisation plus importante dans le second scénario de nouvelles technologies dont les impacts sont pour certaines catégories et avec les hypothèses actuelles légèrement supérieurs à ceux de la filière de référence. Cependant, cela ne signifie pas que ce phénomène va être observé si la production future d'acier suit réellement une des visions modélisées. Au contraire, cette analyse permet de prévenir cet aspect problématique et permet ainsi d'agir dès la phase de recherche et développement pour y faire face. L'ACV-P joue ainsi un rôle fondamental dans l'aide à la décision.

L'analyse effectuée sur les impacts associés à la production d'une tonne d'acier avec la contribution des différentes technologies montre que, selon le scénario considéré, les impacts peuvent être diminués à l'année 2050 par rapport à l'année 2000 jusqu'à 85% pour l'acidification, 80% pour l'eutrophisation, 65% pour le changement climatique, 75% pour la création d'ozone photochimique et 20% pour l'utilisation des ressources. Ces diminutions sont

assez considérables et peuvent influencer des résultats d'analyse effectuée actuellement dans le sens où un produit, dont une partie significative des impacts est due à l'acier le constituant, devrait selon cette analyse les voir diminuer dans les années à venir.

Pour illustrer ce point, un exemple concret est pris avec le cas des éoliennes. Selon Rasmussen (2005), la majeure partie des impacts environnementaux dus à cette technologie proviennent de la production de l'acier et des ses alliages utilisés lors de la fabrication ainsi que de la disposition des ces matériaux en fin de vie. Dans leur revue de littérature sur l'analyse du cycle de vie appliquée aux éoliennes, Arvesen et Hertwich (2012) soulignent le fait que les évolutions temporelles peuvent influencer les résultats des études actuelles, en particulier à cause de sa composition très majoritaire en métaux. L'évolution des technologies dans les domaines de l'extraction minière et de la production de métaux est donc un facteur important à considérer pour les études prospectives associées à cette technologie car ils peuvent modifier significativement les impacts. L'utilisation des résultats de ce projet permet donc d'envisager une diminution importante des impacts associés à la production d'énergie à base d'éoliennes dans les années futures pour les catégories à l'étude.

## **8.2 Recommandations techniques liées à l'étude de cas**

À partir des données issues du projet ULCOS, cette étude de cas a conduit à présenter une analyse prospective de la production d'acier à l'horizon 2050 et de plusieurs technologies associées. Néanmoins, certaines limites de cette étude ont été identifiées et de recommandations sont formulées dans ce paragraphe pour approfondir cette analyse.

Dans un premier temps, il apparaît intéressant de valider les données utilisées pour la modélisation des différentes filières dans le chapitre 4 en les comparant à des données mises à jour tout au long de leur développement. Lorsque les technologies seront effectivement implantées sur des sites de production à une échelle industrielle, une comparaison des entrants et sortants utilisés dans notre modélisation avec ceux mesurés à ce moment-là sur le terrain permettrait de vérifier la pertinence de l'analyse. L'écart entre ces données serait un moyen de mesurer l'incertitude à associer à une telle analyse et permettrait de prendre en considération ce facteur dans de futures études prospectives.

En outre, le développement prospectif des données liées au transport, effectuée par une analyse de données passée et une tentative d'extrapolation des résultats, n'a pas abouti dans ce projet car aucune tendance ou variation significative sur les résultats n'a été observée. Pour étudier ce facteur de façon plus précise, une étude économique plus approfondie sur l'évolution temporelle des marchés serait nécessaire. À l'aide de modèles technico-économiques considérant les stocks de ressources dans les différentes régions, l'évolution de leurs consommations et leurs échanges, la démarche mise en œuvre pour le calcul des distances de transport pourrait être extrapolée de manière plus précise sur l'horizon de temps étudié.

Par ailleurs, les scénarios utilisés pour notre étude ont été développés dans le début des années 2000 et, par conséquent, certaines hypothèses ont évolué depuis. Pour rendre l'analyse plus réaliste, il serait utile de revoir les modélisations pour y inclure des paramètres plus récents. À partir des feuilles de calculs développées dans ce projet, il serait facile de refaire les modélisations en changeant les données utilisées pour les scénarios. De plus, seuls deux scénarios ont été utilisés dans ce projet. Il serait donc intéressant d'en utiliser d'autres pour comparer différentes alternatives au scénario de base et représenter d'autres visions envisageables du futur. Cependant, l'utilisation de nouveaux scénarios doit être pertinente avec ceux employés pour le calcul des facteurs de réduction, sous peine de rendre l'étude incohérente.

### **8.3 Recommandations liées à la méthodologie**

La méthodologie développée pour prendre en considération les effets des politiques environnementales sur l'inventaire a été adaptée au cas d'étude de ce projet. Elle mériterait cependant d'être généralisée. Ce facteur ainsi que certaines limites du travail actuel et les recommandations pour les dépasser sont développés dans ce paragraphe.

Une limite de la méthodologie utilisée dans le calcul des facteurs de réduction est le caractère régional des données considérées. En effet, l'utilisation d'objectifs de réduction et d'une pondération européenne ne tient pas compte du caractère mondial de l'inventaire. Par exemple, d'après les hypothèses posées, une partie de l'extraction des minerais et du charbon a lieu en dehors de l'Europe. Dans ces autres régions du monde, ce ne sont pas les mêmes moyens qui seront mis en œuvre pour lutter contre la pollution atmosphérique, en particulier pour des

pays en voie de développement. Aucune littérature pertinente n'a été trouvée sur l'évolution des objectifs de réduction pour ces régions dans les décennies à venir. Mais des simulations réalisées pour l'Inde ou la Chine (Amann et al., 2008; Purohit et al., 2010) montrent que par leur croissance rapide, les efforts à faire par ces pays diffèrent de ceux de l'Europe et que leurs objectifs seront moindres. L'application de facteurs « européens » à un inventaire comportant des émissions réparties dans tout le monde est donc une approximation relativement importante. La meilleure solution serait d'établir un inventaire géolocalisé des émissions et d'adapter les facteurs de réduction aux lieux d'émission. Selon le développement des pays et leurs politiques, des facteurs de réductions régionaux représenteraient de manière plus réaliste l'évolution des politiques environnementales.

On peut cependant argumenter que de plus en plus d'entreprises évaluent leurs impacts sur toute leur chaîne de valeur et demandent donc aussi à leurs fournisseurs situés dans les pays en voie de développement de faire des efforts en matière de lutte contre la pollution. Le développement d'indicateurs environnementaux comme l'empreinte carbone, calculant les émissions sur tout le cycle de vie d'un produit, devrait pousser les entreprises situées dans différentes régions du monde à agir pour la réduction de leurs émissions. Il apparaît donc cohérent de considérer que ces émissions vont diminuer, même si l'utilisation de facteurs européens surestime cette diminution.

De plus, dans notre étude, les facteurs de réduction ne sont appliqués que sur les émissions répertoriées dans l'inventaire et non sur les entrants qui sont des flux provenant de l'écosphère. Cependant, cette approche est illogique d'un point de vue du bilan de matière sur un processus. S'il y a moins de sortants, il y a normalement moins d'entrants dans le processus. En particulier, l'amélioration technologique conduit à une plus grande efficacité des processus et donc à une diminution des consommations de ressources. Cet aspect est cependant difficilement quantifiable sans rentrer dans le cas particulier de chaque technologie, ce qui explique qu'il n'a pas été étudié ici. De plus, la diminution des émissions sous l'influence de politiques environnementales grâce aux changements technologiques peut s'effectuer dans deux sens contradictoires : une diminution de la consommation de ressources si le changement conduit à utiliser une nouvelle technologie plus efficace ou une augmentation si le changement conduit par exemple à ajouter un filtre supplémentaire, qui va lui consommer des ressources. Le choix de ne pas représenter cet aspect de l'évolution de la consommation de ressources permet de rester entre ces deux hypothèses. Des facteurs de réduction pourraient cependant être développés pour les

secteurs où l'efficacité est clairement réglementée, comme par exemple pour la consommation énergétique des bâtiments.

Par ailleurs, compte tenu de la spécificité de l'étude de cas et des données disponibles, les facteurs de réduction précis n'ont été appliqués qu'à un nombre limité de substances (principalement des polluants transfrontaliers) parmi toutes celles présentes dans l'inventaire. Pour étendre cette méthodologie à d'autres études, il est nécessaire d'étendre la liste de ces substances à d'autres types d'émissions comme les émissions de métaux lourds ou les rejets aqueux. Cependant, ces pollutions possèdent un aspect beaucoup plus localisé et le phénomène de régionalisation y est donc plus important. Les études utilisées pour les facteurs de réduction doivent donc être plus précises pour refléter la spécificité de chaque pays ou région.

En outre, dans le calcul des facteurs de réduction, un facteur de pondération est utilisé pour modéliser la variation des activités entre l'instant initial et celui où le facteur est calculé. Dans notre étude de cas, la production d'acier a été utilisée pour représenter cette variation, mais il serait plus précis d'utiliser pour chaque secteur ou même chaque processus la variation de l'activité de celui-ci. Pour cela, l'utilisation de bases de données Input/Output est une solution envisageable. Ces bases de données permettent de relier les différents secteurs d'activité entre eux. Il est ainsi possible de refléter l'impact actuel d'une augmentation de l'activité sidérurgique sur tous les autres secteurs d'activité et de modéliser ensuite par extrapolation la variation des différents secteurs en fonction de celle de la production d'acier.

Finalement, dans notre étude de cas, les facteurs de réduction ont été appliqués au cas par cas sur les différentes données de l'inventaire. Pour généraliser cette approche, il est nécessaire de l'implémenter directement dans les bases de données sous forme d'une paramétrisation des données. Pour ce faire, la base de données doit être la plus désagrégée possible pour permettre d'appliquer des facteurs de réduction différents en fonction des secteurs d'activité, comme il a été fait dans notre étude. Les bases de données comme ecoinvent possèdent ce niveau de désagrégation et disposent déjà d'informations sur le secteur d'activité associé à chacun des ces processus, codées sous la forme de la classification ISIC (International Standard Industrial Classification). En adaptant cette classification aux secteurs SNAP utilisés dans notre étude, il serait possible de raffiner l'utilisation des facteurs de réduction. Dans une base de données, un processus fait souvent appel à d'autres processus qui ne sont pas du même secteur que lui. Par

exemple, l'extraction de minerais peut faire appel à des processus de production d'électricité ou de pétrole. L'implantation des facteurs de réduction directement dans la base de données permettrait d'appliquer précisément à chaque processus le facteur qui lui est associé alors que dans ce projet, la donnée utilisée pour le minerais étant agrégée à cause des logiciels utilisés, cette différenciation n'a pas pu être faite et le facteur appliqué est celui du secteur de l'industrie minière.



## CONCLUSION

Ce mémoire a été l'occasion de développer une approche novatrice d'analyse du cycle de vie prospective et de l'appliquer à la sidérurgie. L'objectif de ce projet est donc rempli. L'étude de cas menée repose sur l'évaluation de la performance environnementale future de différentes filières de production d'acier, dont celles développées dans le programme ULCOS.

Dans un premier temps, une analyse du cycle de vie attributionnelle a été effectuée en se basant sur les données actuelles associées à ces technologies. Les résultats de cette analyse préliminaire ont montré que les nouvelles technologies étudiées possèdent un plus faible impact sur le changement climatique que la filière traditionnelle par haut fourneau, utilisée comme référence. Pour les autres catégories d'impacts étudiées (acidification, eutrophisation, création d'ozone photochimique et utilisation des ressources), les conclusions sont plus mitigées. Dans ces catégories, certaines filières présentent en effet des impacts supérieurs à ceux de la référence. Il est donc essentiel de prendre en considération cet aspect avant leur future implémentation pour éviter un déplacement d'impacts.

L'approche prospective a ensuite été développée à partir de cette étude initiale. Les évolutions des sources d'électricité et du transport ont d'abord été modélisées puis une méthode a été développée pour intégrer l'effet des politiques environnementales sur les données d'inventaire. Cette approche prospective a permis de comparer deux visions du futur, une première « *business as usual* » et une seconde plus stricte en matière d'émissions de gaz à effet de serre. Pour ces deux scénarios, les impacts associés à chaque technologie diminuent avec le temps sur la période considérée (2000-2050). À partir de ces résultats calculés pour chaque filière actuelle ou future de production d'acier, les impacts associés à la sidérurgie dans son ensemble ont été modélisés. Ils montrent que la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> associées à la production d'une tonne d'acier d'un facteur 50% d'ici 2050 est un objectif atteignable et que les impacts dans les autres catégories considérées devraient aussi diminuer en parallèle.

D'un point de vue théorique, une méthodologie générale pour la réalisation d'une analyse du cycle de vie prospective a été proposée. Plus particulièrement, la méthode développée pour intégrer l'effet de futures politiques environnementales sur les données de l'inventaire est

originale et apporte une solution nouvelle à un phénomène peu considéré actuellement. Même si cette méthodologie a été mise en place dans le cas particulier de notre étude de cas, elle est adaptable et généralisable à d'autres analyses. Son application a néanmoins soulevé certaines limites et par conséquent, plusieurs recommandations sont formulées pour améliorer cette méthode :

- Affiner les facteurs de réduction avec par exemple une régionalisation des objectifs de réduction ou l'utilisation de bases de données I/O pour les données de variation de la production
- Étendre la méthodologie à toutes les substances de l'inventaire (surtout si on veut considérer d'autres catégories d'impacts que celles du projet) et aux données sur les entrants dans les processus
- Paramétrer la méthode dans des bases de données pour faciliter son utilisation et améliorer sa précision

D'autres recommandations ont également été formulées en rapport avec l'étude de cas :

- Comparer les données modélisées aux futures données mesurées sur les sites de production pour mesurer les écarts entre prévisions et réalité
- Améliorer l'étude de la variation prospective du transport, en utilisant par exemple des modèles économiques, pour l'inclure dans l'étude
- Mettre à jour les scénarios prospectifs pour les adapter aux nouvelles données et proposer de nouvelles visions alternatives pour le futur.

En conclusion, l'utilisation d'une approche prospective telle que développée dans cette étude n'a pas pour objectif de prédire le futur. Il apparaît peu probable qu'un des deux scénarios étudiés soit précisément suivi dans les prochaines décennies. Néanmoins, ces travaux visent à faire réfléchir à différents enjeux futurs et à fournir des pistes de réflexion pour orienter la prise de décision.

## RÉFÉRENCES

- Agence Internationale de l'Énergie. (2012). *Energy Technology Perspectives 2012 : Pathways to a Clean Energy System*. Tiré de <http://www.iea.org/etp/>
- Alcamo, J. (2001). *Scenarios as tools for international environmental assessments*. (No 24). Tiré de [http://www.eea.europa.eu/publications/environmental\\_issue\\_report\\_2001\\_24](http://www.eea.europa.eu/publications/environmental_issue_report_2001_24)
- Amann, M., Borken-Kleefeld, J., Cofala, J., Heyes, C., Klimont, Z., Rafaj, P., . . . Winiwarter, W. (2012). *Future emissions of air pollutants in Europe – Current legislation baseline and the scope for further reductions*. Tiré de <http://gains.iiasa.ac.at/index.php/policyapplications/tsap/390-future-emissions-of-air-pollutants-in-europe-current-legislation-baseline-and-the-scope-for-further-reductions>
- Amann, M., Kejun, J., Jiming, H., Wang, S., Xing, Z., & Wei, W. (2008). *Scenarios for cost-effective control of air pollution and greenhouse gases in China*. Tiré de <http://gains.iiasa.ac.at/index.php/reports5>
- Arvesen, A., & Hertwich, E. G. (2012). Assessing the life cycle environmental impacts of wind power: A review of present knowledge and research needs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 5994-6006.
- Astier, J. (2009). Grandes usines sidérurgiques intégrées classiques *Techniques de l'ingénieur*(TI554).
- Barton, J., Schneider, A., & Jager, J. (2002). Role of LCA in the design of research and development (R&D) of novel processes subject to IPPC and BAT. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 7(1), 11-17.
- Bellevrat, E., & Menanteau, P. (2008). *Introducing Carbon Constraint in the Steel Sector: ULCOS Scenarios and Economic Modeling*. Papier présenté au 4th Ulcos Seminar, Essen.
- Beloin-Saint-Pierre, D., & Blanc, I. (2011). *New spatiotemporally resolved LCI applied to photovoltaic electricity*. Papier présenté à la Life Cycle Management 2011, Berlin, Germany.
- Béranger, G. (2006). *The book of steel*. Paris, France: Lavoisier.
- Berger, G. (1964). *Phénoménologie du temps et prospective*: Presses Universitaires de France.
- Birat, J.-P., Lorrain, J.-P., & de Lassat, Y. (2008). *The “CO2 Tool”: CO2 Emissions & Energy Consumption of Existing & Breakthrough Steelmaking Routes*. Papier présenté au 4th Ulcos Seminar, Essen.
- Börjeson, L., Höjer, M., Dreborg, K.-H., Ekvall, T., & Finnveden, G. (2006). Scenario types and techniques: Towards a user's guide. *Futures*, 38(7), 723-739.

- Caduff, M., Huijbregts, M. A. J., Althaus, H.-J., Koehler, A., & Hellweg, S. (2012). Wind Power Electricity: The Bigger the Turbine, The Greener the Electricity? *Environmental Science & Technology*, 46(9), 4725-4733.
- Calel, R., & Dechezleprêtre, A. (2012). *Environmental policy and directed technological change: evidence from the European carbon market*. Tiré de <http://www2.lse.ac.uk/GranthamInstitute/publications/WorkingPapers/Abstracts/70-79/environmental-policy-european-carbon-market.aspx>
- Center on Emission Inventories and Projections [CEIP]. (2012). WebDab - EMEP database. Consulté le 15 aout 2012. <http://www.ceip.at/webdab-emission-database/>
- Classen, M., Althaus, H.-J., Blaser, S., Tuchschnid, M., Jungbluth, N., & Emmenegger, M. F. (2007). *Life Cycle Inventories of Metals*. Tiré de ecoinvent v2.0 reports
- Clift, R. (2006). Sustainable development and its implications for chemical engineering. [doi: 10.1016/j.ces.2005.10.017]. *Chemical Engineering Science*, 61(13), 4179-4187.
- CML. (2012). CML-IA Characterisation Factors. Consulté le 10 octobre 2011, Tiré de <http://cml.leiden.edu/software/data-cmlia.html - features>
- Collet, P., Hélias, A., Lardon, L., & Steyer, J.-P. (2011). Time and Life Cycle Assessment: How to Take Time into Account in the Inventory Step? In M. Finkbeiner (Ed.), *Towards Life Cycle Sustainability Management*, pp 119-130 : Springer Netherlands.
- Consortium ULCOS. (2012). À propos d'ULCOS. Consulté le 20 septembre 2012, Tiré de [http://www.ulcos.org/fr/about\\_ulcos/home.php](http://www.ulcos.org/fr/about_ulcos/home.php)
- De Jouvenel, H. (2004). *Invitation à la prospective*. France: Futuribles.
- Earles, J., & Halog, A. (2011). Consequential life cycle assessment: a review. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(5), 445-453.
- Ekvall, T., & Weidema, B. P. (2004). System boundaries and input data in consequential life cycle inventory analysis. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 9(3), 161-171.
- ESU-services. (2008). *NEEDS Project : LCA of Background Processes*. Tiré de <http://www.needs-project.org/index.php?option=com-content&task=view&id=42>
- European Commission JRC-IES. (2010). *Framework and requirements for Life Cycle Impact Assessment models and indicators*. Tiré de <http://lct.jrc.ec.europa.eu/pdf-directory/ILCD-Handbook-LCIA-Framework-requirements-online-12March2010.pdf>
- European Environment Agency. (2012). National emissions reported to the UNFCCC and to the EU Greenhouse Gas Monitoring Mechanism. Consulté le 8 octobre 2012 <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/national-emissions-reported-to-the-unfccc-and-to-the-eu-greenhouse-gas-monitoring-mechanism-6>

- Frijia, S., Guhathakurta, S., & Williams, E. (2011). Functional Unit, Technological Dynamics, and Scaling Properties for the Life Cycle Energy of Residences. [doi: 10.1021/es202202q]. *Environmental Science & Technology*, 46(3), 1782-1788.
- Frischknecht, R., Büsser, S., & Krewitt, W. (2009). Environmental assessment of future technologies: how to trim LCA to fit this goal? *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 14(6), 584-588.
- Frischknecht, R., & Rebitzer, G. (2005). The ecoinvent database system: a comprehensive web-based LCA database. *Journal of Cleaner Production*, 13(13-14), 1337-1343.
- Godet, M. (2007). *Manuel de prospective stratégique: Une indisciplinée intellectuelle*: Dunod.
- Godet, M. (2010). Future memories. *Technological Forecasting and Social Change*, 77(9), 1457-1463.
- GreenDeltaTC GmbH. (2011). openLCA (Version 1.2.4). Berlin, Allemagne. Retrieved from <http://www.openlca.org>
- Guinée, J. B., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., . . . Rydberg, T. (2010). Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future†. *Environmental Science & Technology*, 45(1), 90-96.
- Hospido, A., Davis, J., Berlin, J., & Sonesson, U. (2010). A review of methodological issues affecting LCA of novel food products. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(1), 44-52.
- Iosif, A.-M., Hanrot, F., & Ablitzer, D. (2008). Process integrated modelling for steelmaking Life Cycle Inventory analysis. *Environmental Impact Assessment Review*, 28(7), 429-438.
- Irvine, J., & Martin, B. R. (1984). *Foresight in science: picking the winners*: F. Pinter.
- Jaffe, A., Newell, R., & Stavins, R. (2002). Technological Change and the Environment. *Environmental and Resources Economics*, 22, 41-69.
- Johnstone, N., Hascic, I., & Ostertag, K. (2008). *Politique environnementale, innovation technologique et dépôts de brevets*. Tiré de [http://www.oecd-ilibrary.org/environment/politique-environnementale-innovation-technologique-et-depots-de-brevets\\_9789264046849-fr](http://www.oecd-ilibrary.org/environment/politique-environnementale-innovation-technologique-et-depots-de-brevets_9789264046849-fr)
- Joliet, O., Saadé, M., & Crettaz, P. (2005). *Analyse du cycle de vie: Comprendre et réaliser un écobilan*: Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Jonasson, K., & Sandén, B. (2004). *Time and Scale Aspects in Life Cycle Assessment of Emerging Technologies : Case Study on Alternative Transport Fuels*. Tiré de <http://publications.lib.chalmers.se/publication/10227-time-and-scale-aspects-in-life-cycle-assessment-of-emerging-technologies-case-study-on-alternative-t>

- Jorgenson, J. D., Tolcin, C., & Roberts, L. (2002). *U.S. Geological Survey minerals yearbook - Iron ore*. Tiré de [http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron\\_ore/index.html - myb](http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron_ore/index.html-myb)
- Jorgenson, J. D., Tolcin, C., & Roberts, L. (2004). *U.S. Geological Survey minerals yearbook - Iron ore*. Tiré de [http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron\\_ore/index.html - myb](http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron_ore/index.html-myb)
- Jorgenson, J. D., Tolcin, C., & Roberts, L. (2006). *U.S. Geological Survey minerals yearbook - Iron ore*. Tiré de [http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron\\_ore/index.html - myb](http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron_ore/index.html-myb)
- Jorgenson, J. D., Tolcin, C., & Roberts, L. (2010). *U.S. Geological Survey minerals yearbook - Iron ore*. Tiré de [http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron\\_ore/index.html - myb](http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron_ore/index.html-myb)
- Kelly, A., Lumberras, J., Maas, R., Pignatelli, T., Ferreira, F., & Engleryd, A. (2010). Setting national emission ceilings for air pollutants: policy lessons from an ex-post evaluation of the Gothenburg Protocol. *Environmental Science & Policy*, 13(1), 28-41.
- Lee, J., Veloso, F. M., & Hounshell, D. A. (2011). Linking induced technological change, and environmental regulation: Evidence from patenting in the U.S. auto industry. *Research Policy*, 40(9), 1240-1252.
- LEPII. (2006). *The POLES Model - State of the Art*. Tiré de <http://webu2.upmf-grenoble.fr/LEPII/spip/spip.php?article113>
- Levasseur, A., Lesage, P., Margni, M., Deschênes, L., & Samson, R. (2010). Considering Time in LCA: Dynamic LCA and Its Application to Global Warming Impact Assessments. [doi: 10.1021/es9030003]. *Environmental Science & Technology*, 44(8), 3169-3174.
- Martin, B. R. (1995). Foresight in science and technology. *Technology Analysis & Strategic Management*, 7(2), 139-168.
- Martin, B. R. (2010). The origins of the concept of 'foresight' in science and technology: An insider's perspective. *Technological Forecasting and Social Change*, 77(9), 1438-1447.
- Memary, R., Giurco, D., Mudd, G., & Mason, L. (2012). Life cycle assessment: a time-series analysis of copper. *Journal of Cleaner Production*, 33(0), 97-108.
- Miles, I. (2010). The development of technology foresight: A review. *Technological Forecasting and Social Change*, 77(9), 1448-1456.
- Millar, I. (2008). *LCA Modelling*. Papier présenté à la 4th Ulcos Seminar, Essen.
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and human well-being, scenarios* (Vol. 2). Washington, USA: Island Press.

- Nicholas, M. J., Clift, R., Azapagic, A., Walker, F. C., & Porter, D. E. (2000). Determination of Best Available Techniques for Integrated Pollution Prevention and Control: A Life Cycle Approach. *Process Safety and Environmental Protection*, 78(3), 193-203.
- Organisation internationale de normalisation [ISO]. (2006a) *Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Exigences et lignes directrices*. Organisation internationale de normalisation, ISO 14044.
- Organisation Internationale de Normalisation [ISO]. (2006b) *Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre*. Organisation internationale de normalisation, ISO 14040.
- Owens, J. W. (1997). Life-Cycle Assessment in Relation to Risk Assessment: An Evolving Perspective. *Risk Analysis*, 17(3), 359-365.
- Pehnt, M. (2003). Assessing future energy and transport systems: the case of fuel cells. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 8(5), 283-289.
- Pennington, D. W., Potting, J., Finnveden, G., Lindeijer, E., Jolliet, O., Rydberg, T., & Rebitzer, G. (2004). Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice. *Environment International*, 30(5), 721-739.
- Pesonen, H., Ekvall, T., Fleischer, G., Huppel, G., Jahn, C., Klos, Z., . . . Wenzel, H. (2000). Framework for scenario development in LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 5(1), 21-30.
- Pettersen, J., & Hertwich, E. G. (2008). Critical Review: Life-Cycle Inventory Procedures for Long-Term Release of Metals. *Environmental Science & Technology*, 42(13), 4639-4647.
- Purohit, P., Amann, M., Mathur, R., Gupta, I., Marwah, S., Verma, V., & Bertok, I. (2010). *Scenarios for cost-effective control of air pollution and greenhouse gases in India*. Tiré de <http://gains.iiasa.ac.at/index.php/reports5>
- Rasmussen, B., Borup, M., Borch, K., & Andersen, P. D. (2005). Prospective technology studies with a life cycle perspective. *International Journal of Technology, Policy and Management*, 5(3), 227-239.
- Reap, J., Roman, F., Duncan, S., & Bras, B. (2008a). A survey of unresolved problems in life cycle assessment - Part 1. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 13(4), 290-300.
- Reap, J., Roman, F., Duncan, S., & Bras, B. (2008b). A survey of unresolved problems in life cycle assessment - Part 2. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 13(5), 374-388.
- Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., . . . Pennington, D. W. (2004). Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environment International*, 30(5), 701-720.

- Sandén, B. A., & Karlström, M. (2007). Positive and negative feedback in consequential life-cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 15(15), 1469-1481.
- Sleeswijk, A. W., van Oers, L. F. C. M., Guinée, J. B., Struijs, J., & Huijbregts, M. A. J. (2008). Normalisation in product life cycle assessment: An LCA of the global and European economic systems in the year 2000. *Science of The Total Environment*, 390(1), 227-240.
- Stallworth, H. (2006). *Improving EPA Emissions Forecasting For Regulatory Impact Analyses*. Tiré de <http://yosemite.epa.gov/sab/sabproduct.nsf/MeetingCalCOUNCIL/-A5A5683650DC720B852571C40050B8D0?OpenDocument>
- Tillman, A.-M. (2000). Significance of decision-making for LCA methodology. *Environmental Impact Assessment Review*, 20(1), 113-123.
- Udo de Haes, H. A. (2006). How to approach land use in LCIA or, how to avoid the Cinderella effect? *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 11(4), 219-221.
- Udo de Haes, H. A., Finnveden, G., Goedkoop, M., Hauschild, M., Hertwich, E. G., Hofstetter, P., . . . Krewitt, W. (2002). *Life-cycle impact assessment: striving towards best practice*: Society of Environment Toxicology and Chemistry.
- Udo de Haes, H. A., Jolliet, O., Finnveden, G., Hauschild, M., Krewitt, W., & Müller-Wenk, R. (1999). Best available practice regarding impact categories and category indicators in life cycle impact assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 4(3), 167-174.
- Union Européenne. (1996). Council directive concerning integrated pollution prevention and control, 96/61/EC C.F.R. (1996). Tiré de <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:31996L0061:en:HTML>
- United Nations. (1987). *Our Common Future*. Tiré de <http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm>
- United Nations Economic Commission for Europe [UNECE]. (2012a). Parties to UNECE Air Pollution Convention approve new emission reduction commitments for main air pollutants by 2020. Consulté le 15 aout 2012, Tiré de <http://www.unece.org/index.php?id=29858>
- United Nations Economic Commission for Europe [UNECE]. (2012b). Protocols to the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution. Consulté le 15 aout 2012, Tiré de [http://www.unece.org/env/lrtap/status/lrtap\\_s.html](http://www.unece.org/env/lrtap/status/lrtap_s.html)
- United Nations Environmental Program [UNEP]. (2011). *Global guidance principles for life cycle assessment databases - A basis for greener processes and products*. Tiré de <http://www.unep.fr/scp/publications/details.asp?id=DTI/1410/PA>



- Valderrama, C. s., Granados, R., Cortina, J. L., Gasol, C. M., Guillem, M., & Josa, A. (2012). Implementation of best available techniques in cement manufacturing: a life-cycle assessment study. *Journal of Cleaner Production*, 25(0), 60-67.
- Vollebergh, H. (2007). *Impacts of environmental policy instruments on technological change*. Tiré de [http://search.oecd.org/officialdocuments/displaydocumentpdf/?doclanguage=en&cote=com/env/epoc/ctpa/cfa\(2006\)36/final](http://search.oecd.org/officialdocuments/displaydocumentpdf/?doclanguage=en&cote=com/env/epoc/ctpa/cfa(2006)36/final)
- Walser, T., Demou, E., Lang, D. J., & Hellweg, S. (2011). Prospective Environmental Life Cycle Assessment of Nanosilver T-Shirts. *Environmental Science & Technology*, 45(10), 4570-4578.
- Weidema, B. P. (2003). *Market information in life cycle assessemnt*. Tiré de <http://www.norlca.org/resources/780.pdf>
- Weidema, B. P., Ekvall, T., Pesonen, H., Rebitzer, G., Sonnemann, G. W., & Spielmann, M. (2001). *Scenarios in Life-Cycle Assessment*. Tiré de [https://http://www.setac.net/setacssa/ecssashop.show\\_product\\_detail?p\\_mode=detail&p\\_product\\_serno=147&p\\_cust\\_id=&p\\_order\\_serno=&p\\_promo\\_cd=&p\\_price\\_cd=&p\\_category\\_id=](https://http://www.setac.net/setacssa/ecssashop.show_product_detail?p_mode=detail&p_product_serno=147&p_cust_id=&p_order_serno=&p_promo_cd=&p_price_cd=&p_category_id=)
- Wender, B. A., & Seager, T. P. (2011, 16-18 May 2011). *Towards prospective life cycle assessment: Single wall carbon nanotubes for lithium-ion batteries*. Papier présenté à la Sustainable Systems and Technology (ISSST), 2011 IEEE International Symposium on.
- World Steel Association. (2001). *Life Cycle Assessment Methodology Report*. Tiré de [http://worldsteel.org/dms/internetDocumentList/bookshop/LCA-Methodology-Report/document/LCA Methodology Report.pdf](http://worldsteel.org/dms/internetDocumentList/bookshop/LCA-Methodology-Report/document/LCA%20Methodology%20Report.pdf)
- World Steel Association. (2010). Life Cycle Inventory for steel products. Consulté le 15 septembre 2011, from World Steel Association <http://www.worldsteel.org/steel-by-topic/life-cycle-assessment/about-the-lci.html>
- World Steel Association. (2011). Annual crude steel production 2000-2010. Consulté le 05 avril 2012 <http://www.worldsteel.org/statistics/statistics-archive/annual-steel-archive.html>
- World Steel Association. (2012). Annual crude steel production 2011. Consulté le 16 juin 2012 <http://www.worldsteel.org/statistics/statistics-archive/annual-steel-archive.html>
- Yellishetty, M., Mudd, G. M., & Ranjith, P. G. (2011). The steel industry, abiotic resource depletion and life cycle assessment: a real or perceived issue? *Journal of Cleaner Production*, 19(1), 78-90.

## ANNEXES

### ANNEXE I – Termes techniques utilisés en analyse du cycle de vie

Les définitions suivantes sont issues de la norme ISO 14040 (ISO, 2006a, 2006b) et concernent des termes clefs utilisés en analyse du cycle de vie.

- **analyse d'incertitude** : procédure systématique permettant de rechercher, puis de quantifier, l'incertitude introduite dans les résultats d'un inventaire du cycle de vie par les effets cumulés de l'imprécision du modèle, de l'incertitude sur les intrants et de la variabilité des données
- **analyse de sensibilité** : procédure systématique pour estimer les effets sur les résultats d'une étude des choix concernant les méthodes et les données
- **analyse du cycle de vie (ACV)** : compilation et évaluation des intrants, des extrants et des impacts environnementaux potentiels d'un système de produits au cours de son cycle de vie
- **catégorie d'impact** : classe représentant les points environnementaux étudiés à laquelle les résultats de l'inventaire du cycle de vie peuvent être affectés
- **contrôle de cohérence** : procédé, mis en œuvre avant d'arriver aux conclusions, permettant de vérifier que les hypothèses, les méthodes et les données sont appliquées de manière cohérente tout au long de l'étude, et conformément à la définition des objectifs et du champ de l'étude
- **contrôle de complétude** : procédé permettant de vérifier si les informations des phases précédentes d'une analyse du cycle de vie suffisent pour arriver à des conclusions conformément à la définition des objectifs et du champ de l'étude
- **contrôle de sensibilité** : procédé permettant de vérifier que les informations obtenues à partir d'une analyse de sensibilité sont pertinentes pour établir des conclusions et donner des recommandations
- **coproduit** : l'un quelconque de deux produits ou plus issus du même processus élémentaire ou système de produits
- **critères de coupure** : spécification de la quantité de flux de matière ou d'énergie ou du niveau de signification environnementale associés aux processus élémentaires ou au système de produits devant être exclus de l'étude

- **cycle de vie** : phases consécutives et liées d'un système de produits, de l'acquisition des matières premières ou de la génération des ressources naturelles à l'élimination finale
- **déchet** : substances ou objets que le détenteur a l'intention d'éliminer ou qu'il est tenu d'éliminer
- **émissions** : émissions dans l'air et rejets dans l'eau et le sol
- **évaluation de l'impact du cycle de vie (EICV)** : phase de l'analyse du cycle de vie destinée à comprendre et évaluer l'ampleur et l'importance des impacts potentiels d'un système de produits sur l'environnement au cours de son cycle de vie
- **extrait** : flux de produit, de matière ou d'énergie sortant d'un processus élémentaire
- **facteur de caractérisation** : facteur établi à partir d'un modèle de caractérisation qui est utilisé pour convertir les résultats de l'inventaire du cycle de vie en unité commune d'indicateur de catégorie
- **flux de produits** : produits entrant ou sortant d'un système de produits en direction d'un autre
- **flux de référence** : mesure des extraits des processus, dans un système de produits donné, nécessaire pour remplir la fonction telle qu'elle est exprimée par l'unité fonctionnelle
- **flux élémentaire** : matière ou énergie entrant dans le système étudié, qui a été puisée dans l'environnement sans transformation humaine préalable, ou matière ou énergie sortant du système étudié, qui est rejetée dans l'environnement sans transformation humaine ultérieure
- **flux intermédiaire** : flux de produit, de matière ou d'énergie intervenant entre des processus élémentaires du système de produits étudié
- **frontière du système** : ensemble de critères qui spécifient quels processus élémentaires font partie d'un système de produits
- **impact final par catégorie** : attribut ou aspect de l'environnement naturel, de la santé humaine ou des ressources, permettant d'identifier un point environnemental à problème
- **indicateur de catégorie d'impact** : représentation quantifiable d'une catégorie d'impact
- **interprétation du cycle de vie** : phase de l'analyse du cycle de vie au cours de laquelle les résultats de l'analyse de l'inventaire ou de l'évaluation de l'impact, ou des deux, sont évalués en

relation avec les objectifs et le champ définis pour l'étude afin de dégager des conclusions et des recommandations

- **intrant** : flux de produit, de matière ou d'énergie entrant dans un processus élémentaire
- **inventaire du cycle de vie (ICV)** : phase de l'analyse du cycle de vie impliquant la compilation et la quantification des intrants et des extrants, pour un système de produits donné au cours de son cycle de vie
- **matière première** : matière première ou secondaire utilisée pour réaliser un produit
- **processus** : ensemble d'activités corrélées ou interactives qui transforme des intrants en extrants
- **processus élémentaire** : plus petite partie prise en compte dans l'inventaire du cycle de vie pour laquelle les données d'entrée et de sortie sont quantifiées
- **produit** : tout bien ou service
- **produit intermédiaire** : extrant d'un processus élémentaire qui est un intrant vers d'autres processus élémentaires parce qu'il nécessite une transformation ultérieure au sein du système
- **qualité des données** : caractéristiques des données reposant sur leur capacité à répondre aux exigences requises
- **résultat de l'inventaire du cycle de vie** : issue d'un inventaire du cycle de vie qui catalogue les flux traversant les frontières du système et fournit le point de départ pour l'évaluation de l'impact du cycle de vie
- **système de produits** : ensemble de processus élémentaires comportant des flux de produits et des flux élémentaires, remplissant une ou plusieurs fonctions définies, qui sert de modèle au cycle de vie d'un produit
- **unité fonctionnelle** : performance quantifiée d'un système de produits destinée à être utilisée comme unité de référence dans une analyse du cycle de vie
- **vérification** : élément de la phase d'interprétation du cycle de vie permettant d'établir la confiance dans les résultats de l'étude de l'analyse du cycle de vie

## ANNEXE II – Évolution des distances de transport pour le minerai de fer

Pour étudier l'influence du temps sur les impacts associés au transport, les distances utilisées initialement pour le minerai de fer ont été recalculées avec des données variant entre les années 2000 et 2010. Comme pour les calculs initiaux (cf paragraphe 3.2.3), les données utilisées proviennent de l'U.S. Geological Survey (Jorgenson, Tolcin, & Roberts, 2002, 2006, 2010) et de la Worldsteel Association (World Steel Association, 2011). Les calculs effectués sont regroupés dans les tableaux suivants.

Année 2000 :

Tableau II-2 : Répartition géographique de la production et de la consommation de minerai de fer pour l'année 2000

	Production de minerai de fer	Production de fonte	Minerai de fer consommé par la production de fonte	Importation	Exportation	Sources des exportations
	(M tonnes)	(M tonnes)	(M tonnes)	(M tonnes)	(M tonnes)	%
	USGS	Worldsteel	calculs	calculs	calculs	
Europe de l'Ouest	21	118	215	194		
Europe de l'Est	159	74	135		24	7%
Asie	319	273	497	178		
Afrique	56	9	16		40	11%
Amérique du Nord	113	62	113		0	0%
Amérique du Sud	195	32	58		137	37%
Océanie	185	8	15		170	46%
Total	1048	576	1048	371	371	

Tableau II-3 : Transport du minerai pour l'année 2000

Lieu de production	Pourcentage	Moyen de transport	Distance (km)
Océanie	$90\% * 46\% = 41\%$	Train	1000
		Bateau	15500
		Barge	170
Amérique du Sud	$90\% * 37\% = 33\%$	Train	1000
		Bateau	8600
		Barge	170
Afrique	$90\% * 11\% = 10\%$	Train	1000
		Bateau	6000
		Barge	170
Europe de l'Est	$90\% * 7\% = 6\%$	Train	2500
Europe de l'Ouest	10%	Train	500

Année 2002 :

Tableau II-4 : Répartition géographique de la production et de la consommation de minerai de fer pour l'année 2002

	Production de minerai de fer	Production de fonte	Minerai de fer consommé par la production de fonte	Importation	Exportation	Sources des exportations
	(M tonnes)	(M tonnes)	(M tonnes)	(M tonnes)	(M tonnes)	%
	USGS	Worldsteel	calculs	calculs	calculs	
Europe de l'Ouest	25	114	204	179		
Europe de l'Est	160	78	140		20	5%
Asie	333	315	563	230		
Afrique	14	11	20	6		
Amérique du Nord	95	53	95		0	
Amérique du Sud	281	33	59		222	53%
Océanie	185	7	13		172	42%
Total	1093	611	1093	415	415	

Tableau II-5 : Transport du minerai pour l'année 2002

Lieu de production	Pourcentage	Moyen de transport	Distance (km)
Océanie	$88\% * 42\% = 36\%$	Train	1000
		Bateau	15500
		Barge	170
Amérique du Sud	$88\% * 53\% = 47\%$	Train	1000
		Bateau	8600
		Barge	170
Afrique	0	Train	1000
		Bateau	6000
		Barge	170
Europe de l'Est	$88\% * 5\% = 4\%$	Train	2500
Europe de l'Ouest	12%	Train	500

Année 2004 :

Tableau II-6 : Répartition géographique de la production et de la consommation de minerai de fer pour l'année 2004

	Production de minerai de fer	Production de fonte	Minerai de fer consommé par la production de fonte	Importation	Exportation	Sources des exportations
	(M tonnes)	(M tonnes)	(M tonnes)	(M tonnes)	(M tonnes)	%
	USGS	Worldsteel	calculs	calculs	calculs	
Europe de l'Ouest	27	117	221	194		
Europe de l'Est	186	86	163		23	5%
Asie	465	405	766	301		
Afrique	54	10	19		35	7%
Amérique du Nord	95	56	106	11		
Amérique du Sud	296	39	74		222	44%
Océanie	237	6	11		226	45%
Total	1360	719	1360	506	506	

Tableau II-7 : Transport du minerai pour l'année 2004

Lieu de production	Pourcentage	Moyen de transport	Distance (km)
Océanie	$88\% * 45\% = 39\%$	Train	1000
		Bateau	15500
		Barge	170
Amérique du Sud	$88\% * 44\% = 38\%$	Train	1000
		Bateau	8600
		Barge	170
Afrique	$88\% * 7\% = 6\%$	Train	1000
		Bateau	6000
		Barge	170
Europe de l'Est	$88\% * 5\% = 4\%$	Train	2500
Europe de l'Ouest	12%	Train	500

Année 2006 :

Tableau II-8 : Répartition géographique de la production et de la consommation de minerai de fer pour l'année 2006

	Production de minerai de fer	Production de fonte	Minerai de fer consommé par la production de fonte	Importation	Exportation	Sources des exportations
	(M tonnes)	(M tonnes)	(M tonnes)	(M tonnes)	(M tonnes)	%
	USGS	Worldsteel	calculs	calculs	calculs	
Europe de l'Ouest	29	115	241	212		
Europe de l'Est	204	88	185		19	3%
Asie	811	564	1184	373		
Afrique	56	11	23		33	6%
Amérique du Nord	97	50	105	8		
Amérique du Sud	356	37	78		278	47%
Océanie	277	7	15		262	44%
Total	1830	872	1830	593	593	



Tableau II-9 : Transport du minerai pour l'année 2006

Lieu de production	Pourcentage	Moyen de transport	Distance (km)
Océanie	$88\% * 44\% = 39\%$	Train	1000
		Bateau	15500
		Barge	170
Amérique du Sud	$88\% * 47\% = 41\%$	Train	1000
		Bateau	8600
		Barge	170
Afrique	$88\% * 6\% = 5\%$	Train	1000
		Bateau	6000
		Barge	170
Europe de l'Est	$88\% * 3\% = 3\%$	Train	2500
Europe de l'Ouest	12%	Train	500

Année 2008 :

Tableau II-10 : Répartition géographique de la production et de la consommation de minerai de fer pour l'année 2008

	Production de minerai de fer	Production de fonte	Minerai de fer consommé par la production de fonte	Importation	Exportation	Sources des exportations
	(M tonnes)	(M tonnes)	(M tonnes)	(M tonnes)	(M tonnes)	%
	USGS	Worldsteel	calculs	calculs	calculs	
Europe de l'Ouest	29	115	267	238		
Europe de l'Est	204	83	193		11	2%
Asie	1072	650	1511	439		
Afrique	63	9	21		42	6%
Amérique du Nord	107	47	109		-2	0%
Amérique du Sud	391	40	93		298	44%
Océanie	344	7	16		328	48%
Total	2210	951	2210	677	677	

Tableau II-11 : Transport du minerai pour l'année 2008

Lieu de production	Pourcentage	Moyen de transport	Distance (km)
Océanie	$89\% * 48\% = 43\%$	Train	1000
		Bateau	15500
		Barge	170
Amérique du Sud	$89\% * 44\% = 39\%$	Train	1000
		Bateau	8600
		Barge	170
Afrique	$89\% * 6\% = 5\%$	Train	1000
		Bateau	6000
		Barge	170
Europe de l'Est	$89\% * 2\% = 1\%$	Train	2500
Europe de l'Ouest	11%	Train	500

Année 2010 :

Tableau II-12 : Répartition géographique de la production et de la consommation de minerai de fer pour l'année 2010

	Production de minerai de fer	Production de fonte	Minerai de fer consommé par la production de fonte	Importation	Exportation	Sources des exportations
	(M tonnes)	(M tonnes)	(M tonnes)	(M tonnes)	(M tonnes)	%
	USGS	Worldsteel	calculs	calculs	calculs	
Europe de l'Ouest	49	98	245	196		
Europe de l'Est	227	78	195		32	4%
Asie	1328	769	1926	598		
Afrique	70	10	25		45	6%
Amérique du Nord	101	39	98		3	
Amérique du Sud	384	34	85		299	38%
Océanie	433	7	18		415	52%
Total	2592	1035	2592	794	794	

Tableau II-13 : Transport du minerai pour l'année 2010

Lieu de production	Pourcentage	Moyen de transport	Distance (km)
Océanie	$80\% * 52\% = 42\%$	Train	1000
		Bateau	15500
		Barge	170
Amérique du Sud	$80\% * 38\% = 30\%$	Train	1000
		Bateau	8600
		Barge	170
Afrique	$80\% * 6\% = 5\%$	Train	1000
		Bateau	6000
		Barge	170
Europe de l'Est	$80\% * 4\% = 3\%$	Train	2500
Europe de l'Ouest	20%	Train	500

Bilan :

Tableau II-14 : Récapitulatif des distances transportées pour les trois modes de transport

Moyen de transport	Distance totale transportée (km)					
	2000	2002	2004	2006	2008	2010
Train	1040	1002	998	983	971	945
Bateau	9852	9678	9731	9879	10401	9351
Barge	143	142	142	145	150	130

Tableau II-15 : Variation des distances par rapport à celle utilisée dans le chapitre 3

Moyen de transport	Variation de la distance totale transportée (km) (par rapport à l'année 2000)					
	2000	2002	2004	2006	2008	2010
Train	0%	4%	4%	6%	7%	9%
Bateau	0%	2%	1%	0%	-6%	5%
Barge	0%	1%	1%	-1%	-4%	9%

### Bilan sur les impacts :

L'inventaire pour le filière de référence est recalculé pour chaque année en considérant les nouvelles distances de transport pour le minerai de fer. Les impacts sont ensuite évalués à partir de ces nouvelles données. Ils sont reproduits dans le tableau suivant sous la forme d'impacts relatifs par rapport à ceux calculés à l'année 2000.

Tableau II-16 : Récapitulatif des impacts relatifs de la filière de référence recalculés pour les six années considérées

Année	Acidification	Eutrophisation	Changement climatique	Création d'ozone photochimique	Utilisation des ressources
2000	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
2002	98,7%	98,7%	99,7%	99,5%	99,7%
2004	97,7%	97,7%	99,5%	99,1%	99,4%
2006	99,6%	99,4%	99,7%	99,8%	99,6%
2008	102,0%	101,6%	100,1%	100,6%	100,1%
2010	96,4%	96,4%	99,3%	98,7%	99,1%

### ANNEXE III – Objectifs de réduction utilisés pour l'étude

En recoupant une liste de GES et de COV et les substances considérées dans l'inventaire et le calcul des impacts, les facteurs de réductions (FR) s'appliquent aux substances suivantes dans ces deux catégories d'émissions :

Tableau III-1 : Liste des GES considérés dans le calcul des FR

GES
Dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> )
Monoxyde de carbone (CO)
Méthane (CH <sub>4</sub> )
Monoxyde de diazote (N <sub>2</sub> O)
Hexafluorure d'hydrogène (HF <sub>6</sub> )

Tableau III-2 : Liste des COV considérés dans le calcul des FR

COV
Benzène
1,3,5-trimethylbenzène
Chlorobenzène
Butane
Chloroforme
Cyclohexane
Decane
Ethane
Ethane, 1,1,1-trichloro-, HCFC-140
Ethane, 1,1,2-trichloro-1,2,2-trifluoro-, CFC-113
Ethane, 1,2-dichloro-
Ethane, 1,2-dichloro-1,1,2,2-tetrafluoro-, CFC-114
Heptane
Hexane
Isoprène
Methane, bromo-, Halon 1001
Methane, monochloro-, R-40
m-Xylene

Tableau III-3 : Liste des COV considérés dans le calcul des FR, suite

COV
Naphthalène
NMVOC
Octane
o-Dichlorobenzene
o-Xylene
Pentane
Propane
Propane, 1,2-dichloro-
Toluene
Toluene
Xylene

#### Objectifs de réductions utilisés dans le projet

Les tableaux suivants récapitulent les objectifs de réduction utilisés dans ce projet, selon la catégorie SNAP considérée. Les données présentées ci-dessous sont basées sur un pas de temps de 5 ou 10 ans et proviennent d'un rapport de l'IIASA (Amann et al., 2012). Dans la modélisation, une régression linéaire est effectuée pour calculer les objectifs aux années intermédiaires.

Tableau III-4 : Objectifs de réduction appliqués aux GES pour le scénario de référence

GES	Scénario de référence				
	2000	2005	2020	2030	2050
SNAP 1	0%	5%	20%	30%	50%
SNAP 2	0%	5%	20%	30%	50%
SNAP 3	0%	5%	20%	30%	50%
SNAP 4	0%	5%	20%	30%	50%
SNAP 5	0%	5%	20%	30%	50%
SNAP 6	0%	5%	20%	30%	50%
SNAP 7	0%	5%	20%	30%	50%
SNAP 8	0%	5%	20%	30%	50%
SANP 9	0%	5%	20%	30%	50%
SNAP 10	0%	5%	20%	30%	50%
Total	0%	5%	20%	30%	50%

Tableau III-5 : Objectifs de réduction appliqués aux GES pour le scénario alternatif

GES	Scénario alternatif				
	2000	2005	2020	2030	2050
SNAP 1	0%	5%	22%	41%	80%
SNAP 2	0%	5%	22%	41%	80%
SNAP 3	0%	5%	22%	41%	80%
SNAP 4	0%	5%	22%	41%	80%
SNAP 5	0%	5%	22%	41%	80%
SNAP 6	0%	5%	22%	41%	80%
SNAP 7	0%	5%	22%	41%	80%
SNAP 8	0%	5%	22%	41%	80%
SANP 9	0%	5%	22%	41%	80%
SNAP 10	0%	5%	22%	41%	80%
Total	0%	5%	22%	41%	80%

Tableau III-6 : Objectifs de réduction appliqués aux SO<sub>x</sub> pour le scénario de référence

SO <sub>x</sub>	Scénario de référence				
	2000	2005	2020	2030	2050
SNAP 1	0%	25%	88%	90%	94%
SNAP 2	0%	10%	45%	56%	60%
SNAP 3	0%	25%	58%	59%	56%
SNAP 4	0%	9%	26%	25%	29%
SNAP 5	0%	0%	0%	0%	0%
SNAP 6	0%	0%	0%	0%	0%
SNAP 7	0%	78%	96%	96%	96%
SNAP 8	0%	17%	54%	83%	83%
SNAP 9	0%	0%	50%	50%	50%
SNAP 10	0%	8%	8%	8%	8%
Total	0%	23%	76%	79%	82%

Tableau III-7 : Objectifs de réduction appliqués aux SO<sub>x</sub> pour le scénario alternatif

SO <sub>x</sub>	Scénario alternatif				
	2000	2005	2020	2030	2050
SNAP 1	0%	25%	89%	94%	97%
SNAP 2	0%	10%	49%	64%	91%
SNAP 3	0%	25%	58%	60%	76%
SNAP 4	0%	9%	26%	26%	43%
SNAP 5	0%	0%	0%	0%	0%
SNAP 6	0%	0%	0%	0%	0%
SNAP 7	0%	78%	96%	97%	99%
SNAP 8	0%	17%	54%	83%	84%
SNAP 9	0%	0%	50%	50%	50%
SNAP 10	0%	8%	46%	46%	46%
Total	0%	23%	77%	83%	90%



Tableau III-8 : Objectifs de réduction appliqués aux NO<sub>x</sub> pour le scénario de référence

NO <sub>x</sub>	Scénario de référence				
	2000	2005	2020	2030	2050
SNAP 1	0%	5%	58%	64%	69%
SNAP 2	0%	-6%	9%	22%	33%
SNAP 3	0%	5%	29%	29%	21%
SNAP 4	0%	8%	20%	19%	23%
SNAP 5	0%	0%	0%	0%	0%
SNAP 6	0%	0%	0%	0%	0%
SNAP 7	0%	13%	65%	88%	83%
SNAP 8	0%	4%	44%	63%	68%
SNAP 9	0%	9%	45%	45%	45%
SNAP 10	0%	10%	10%	10%	10%
Total	0%	8%	53%	68%	68%

Tableau III-9 : Objectifs de réduction appliqués aux NO<sub>x</sub> pour le scénario alternatif

NO <sub>x</sub>	Scénario alternatif				
	2000	2005	2020	2030	2050
SNAP 1	0%	5%	62%	73%	76%
SNAP 2	0%	-6%	13%	27%	66%
SNAP 3	0%	5%	30%	29%	43%
SNAP 4	0%	8%	20%	21%	42%
SNAP 5	0%	0%	0%	0%	0%
SNAP 6	0%	0%	0%	0%	0%
SNAP 7	0%	13%	70%	89%	96%
SNAP 8	0%	4%	43%	63%	71%
SNAP 9	0%	9%	45%	45%	45%
SNAP 10	0%	10%	10%	10%	13%
Total	0%	8%	56%	71%	80%

Tableau III-8 : Objectifs de réduction appliqués aux PM pour le scénario de référence

PM	Scénario de référence				
	2000	2005	2020	2030	2050
SNAP 1	0%	12%	75%	79%	77%
SNAP 2	0%	4%	25%	42%	52%
SNAP 3	0%	10%	25%	24%	13%
SNAP 4	0%	7%	19%	18%	24%
SNAP 5	0%	-25%	25%	25%	-25%
SNAP 6	0%	0%	0%	0%	0%
SNAP 7	0%	10%	66%	72%	75%
SNAP 8	0%	9%	61%	76%	80%
SNAP 9	0%	1%	2%	1%	2%
SNAP 10	0%	5%	3%	3%	4%
Total	0%	7%	34%	42%	46%

Tableau III-9 : Objectifs de réduction appliqués aux PM pour le scénario alternatif

PM	Scénario alternatif				
	2000	2005	2020	2030	2050
SNAP 1	0%	12%	78%	85%	84%
SNAP 2	0%	4%	31%	51%	46%
SNAP 3	0%	10%	26%	24%	25%
SNAP 4	0%	7%	20%	19%	33%
SNAP 5	0%	-25%	25%	25%	75%
SNAP 6	0%	0%	0%	0%	0%
SNAP 7	0%	10%	66%	73%	76%
SNAP 8	0%	9%	60%	76%	83%
SNAP 9	0%	1%	2%	1%	2%
SNAP 10	0%	5%	30%	29%	29%
Total	0%	7%	39%	48%	50%

Tableau III-8 : Objectifs de réduction appliqués à NH<sub>3</sub> pour le scénario de référence

NH <sub>3</sub>	Scénario de référence				
	2000	2005	2020	2030	2050
SNAP 1	0%	-11%	-89%	-78%	-33%
SNAP 2	0%	-6%	-6%	6%	17%
SNAP 3	0%	0%	-67%	-33%	-100%
SNAP 4	0%	0%	0%	0%	0%
SNAP 5	0%	0%	0%	0%	0%
SNAP 6	0%	0%	0%	0%	0%
SNAP 7	0%	17%	50%	52%	52%
SNAP 8	0%	0%	0%	0%	0%
SNAP 9	0%	-4%	-12%	-12%	-12%
SNAP 10	0%	5%	4%	2%	3%
Total	0%	5%	4%	3%	4%

Tableau III-9 : Objectifs de réduction appliqués à NH<sub>3</sub> pour le scénario alternatif

NH <sub>3</sub>	Scénario alternatif				
	2000	2005	2020	2030	2050
SNAP 1	0%	-11%	-78%	-44%	-33%
SNAP 2	0%	-6%	-6%	11%	11%
SNAP 3	0%	0%	-33%	-33%	-33%
SNAP 4	0%	0%	0%	0%	0%
SNAP 5	0%	0%	0%	0%	0%
SNAP 6	0%	0%	0%	0%	0%
SNAP 7	0%	17%	52%	61%	81%
SNAP 8	0%	0%	0%	0%	0%
SNAP 9	0%	-4%	-12%	-12%	-12%
SNAP 10	0%	5%	4%	2%	3%
Total	0%	5%	5%	3%	5%

Tableau III-8 : Objectifs de réduction appliqués aux COV pour le scénario de référence

COV	Scénario de référence				
	2000	2005	2020	2030	2050
SNAP 1	0%	-2%	1%	8%	22%
SNAP 2	0%	9%	33%	52%	61%
SNAP 3	0%	-4%	-13%	-4%	-40%
SNAP 4	0%	5%	5%	5%	5%
SNAP 5	0%	27%	53%	55%	55%
SNAP 6	0%	0%	0%	0%	0%
SNAP 7	0%	40%	84%	87%	88%
SNAP 8	0%	8%	61%	72%	73%
SNAP 9	0%	8%	23%	23%	23%
SNAP 10	0%	7%	8%	8%	10%
Total	0%	20%	48%	51%	53%

Tableau III-9 : Objectifs de réduction appliqués aux PM pour le scénario alternatif

COV	Scénario alternatif				
	2000	2005	2020	2030	2050
SNAP 1	0%	-2%	7%	14%	19%
SNAP 2	0%	9%	38%	55%	48%
SNAP 3	0%	-4%	-11%	-7%	7%
SNAP 4	0%	5%	6%	6%	18%
SNAP 5	0%	27%	54%	59%	66%
SNAP 6	0%	0%	0%	0%	0%
SNAP 7	0%	40%	84%	89%	95%
SNAP 8	0%	8%	60%	72%	81%
SNAP 9	0%	8%	23%	23%	23%
SNAP 10	0%	7%	44%	44%	44%
Total	0%	20%	49%	54%	56%

## ANNEXE IV – Résultats de l'application des facteurs de réduction

Les graphiques suivants présentent les résultats de l'application des différentes options de facteurs de réduction sur la filière de référence, pour le scénario de référence. Les quatre catégories d'impacts liées aux émissions sont reproduites. Les résultats sont présentés sous la forme d'impacts relatifs par rapport à ceux de l'année 2000.

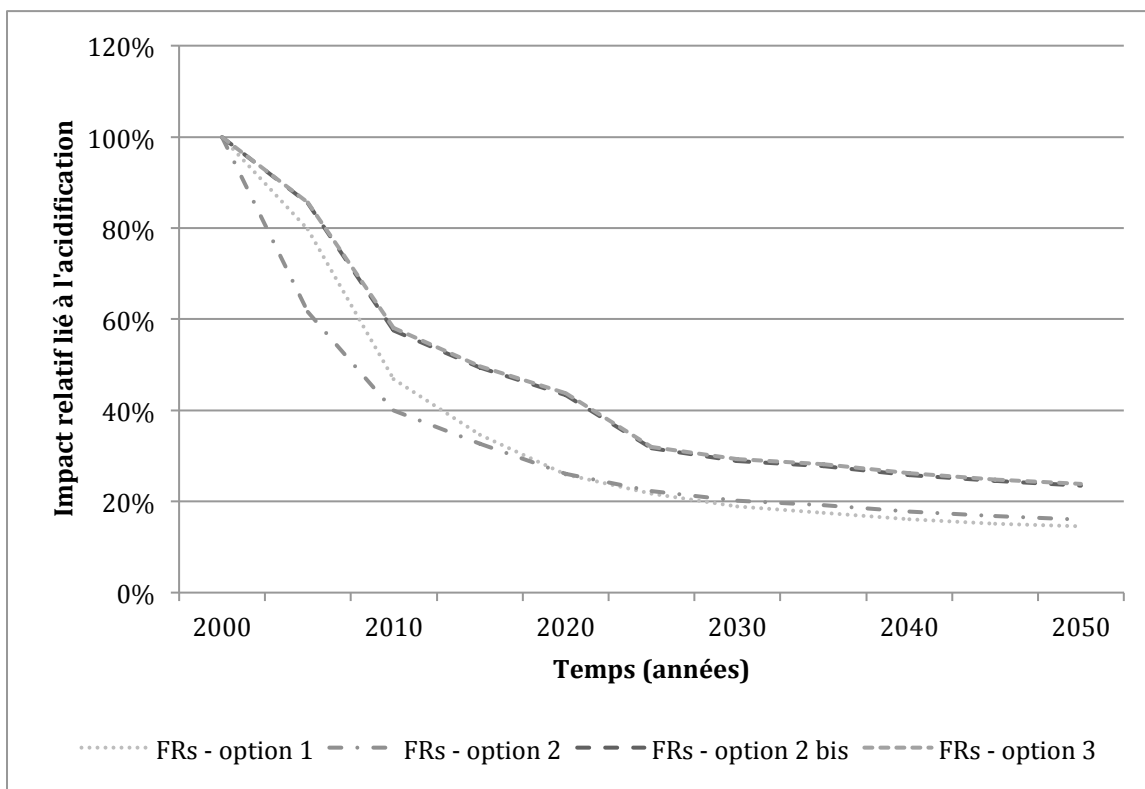


Figure IV-1 : Évolution des impacts relatifs liés à l'acidification pour la filière de référence (scénario de référence)

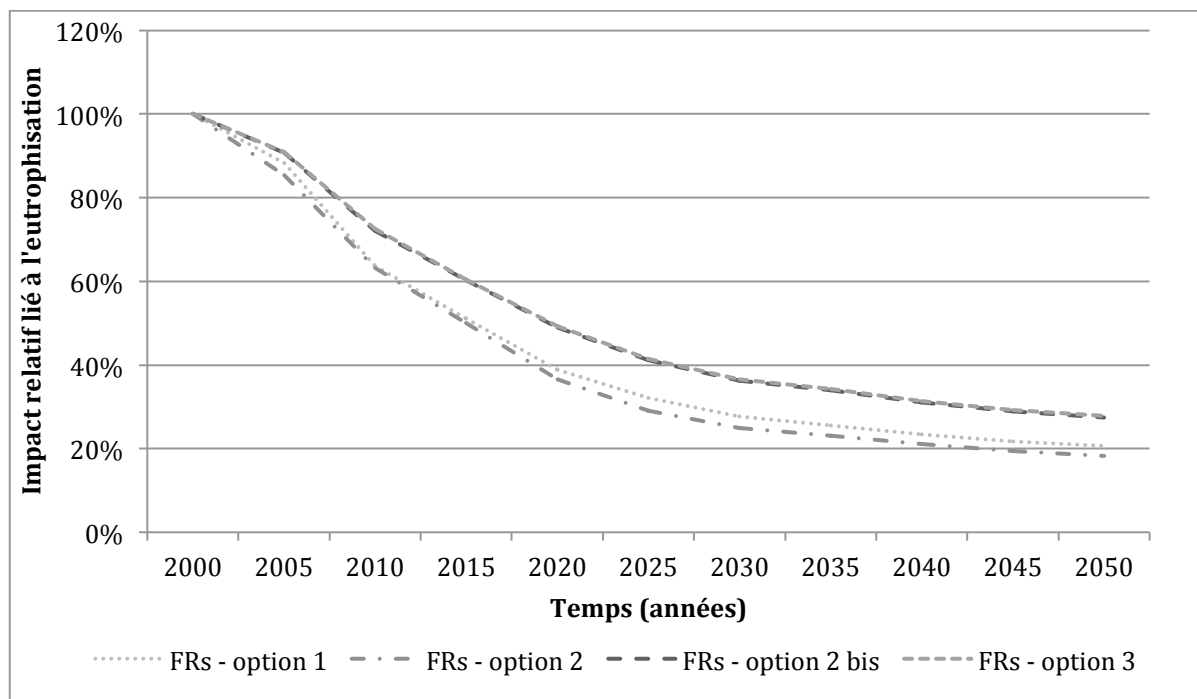


Figure IV-2 : Évolution des impacts relatifs liés à l'eutrophisation pour la filière de référence (scénario de référence)

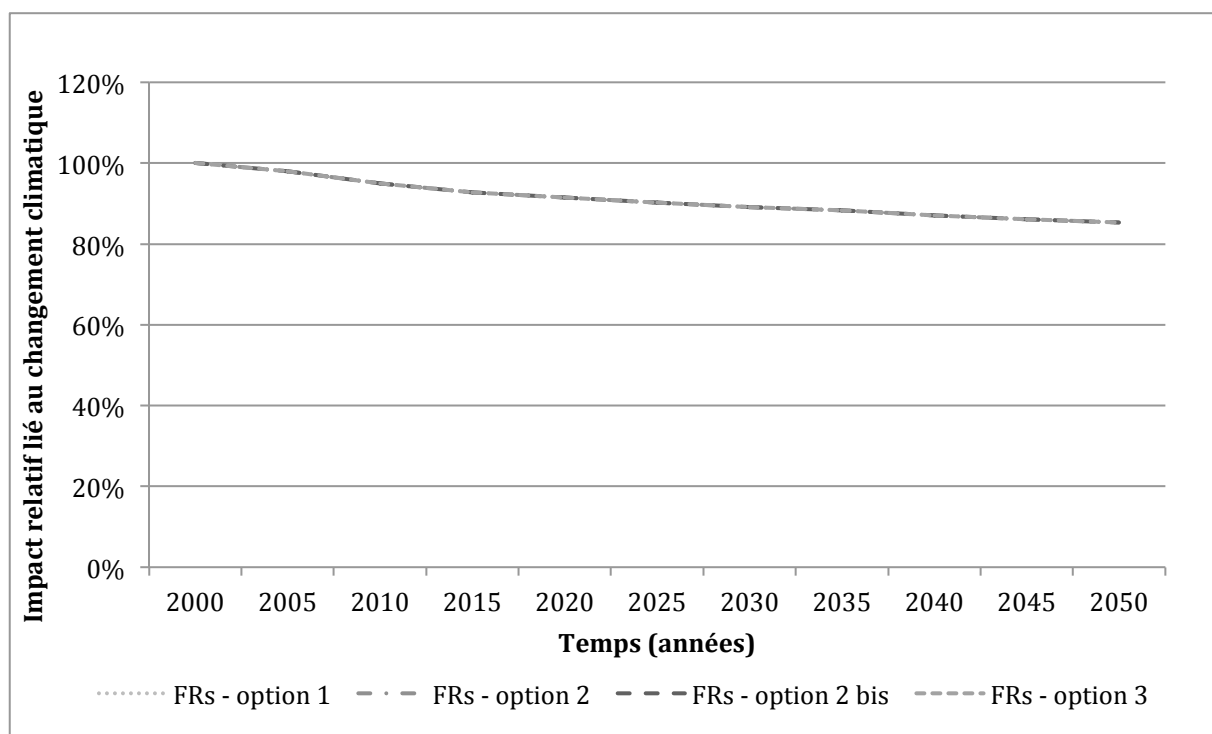


Figure IV-3 : Évolution des impacts relatifs liés au changement climatique pour la filière de référence (scénario de référence)

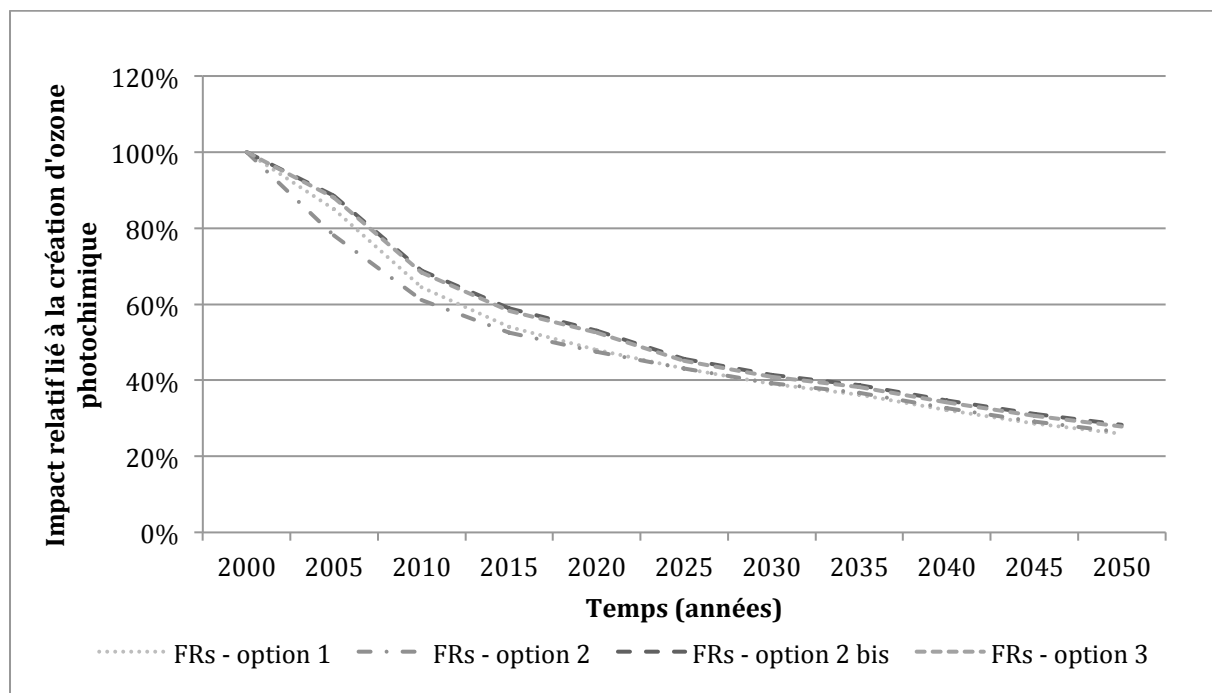


Figure IV-4 : Évolution des impacts relatifs liés à la création d'ozone photochimique pour la filière de référence (scénario de référence)

Les graphiques suivants présentent les résultats de l'application des différentes options de facteurs de réduction sur la filière G, pour le scénario de référence. Les quatre catégories d'impacts liées aux émissions sont reproduites. Les résultats sont présentés sous la forme d'impacts relatifs par rapport à ceux de l'année 2000.

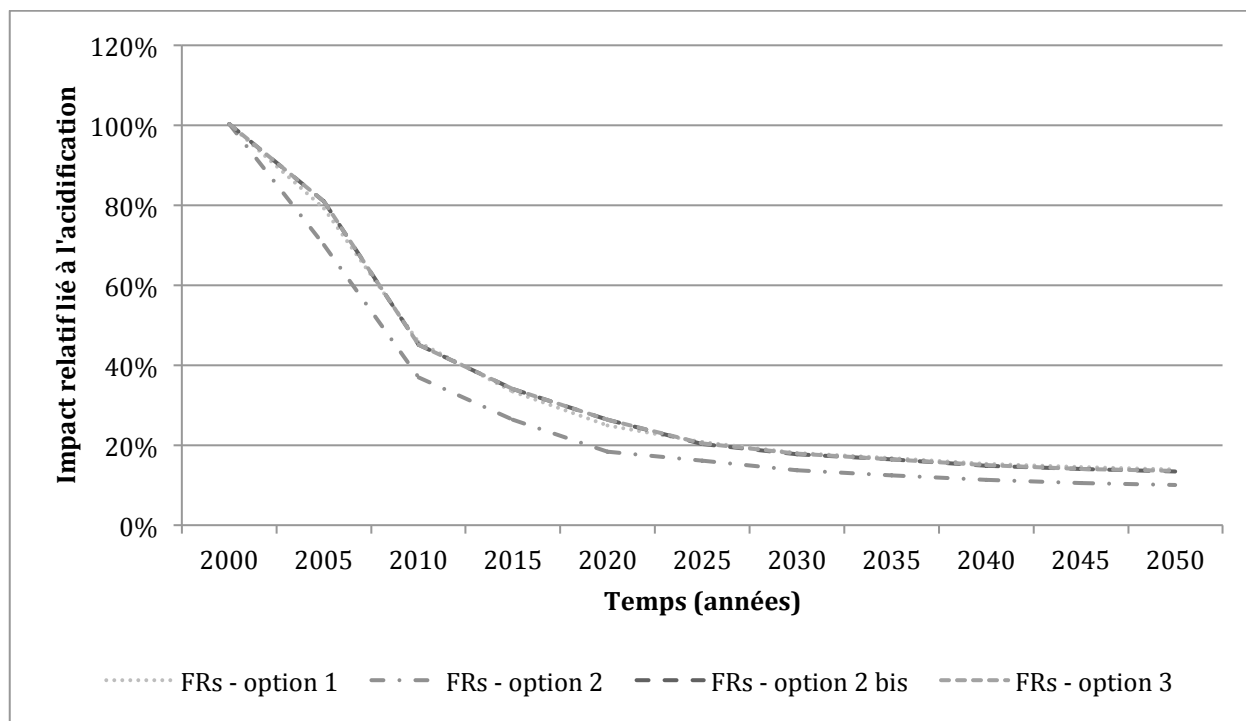


Figure IV-5 : Évolution des impacts relatifs liés à l'acidification pour la filière G  
(scénario de référence)

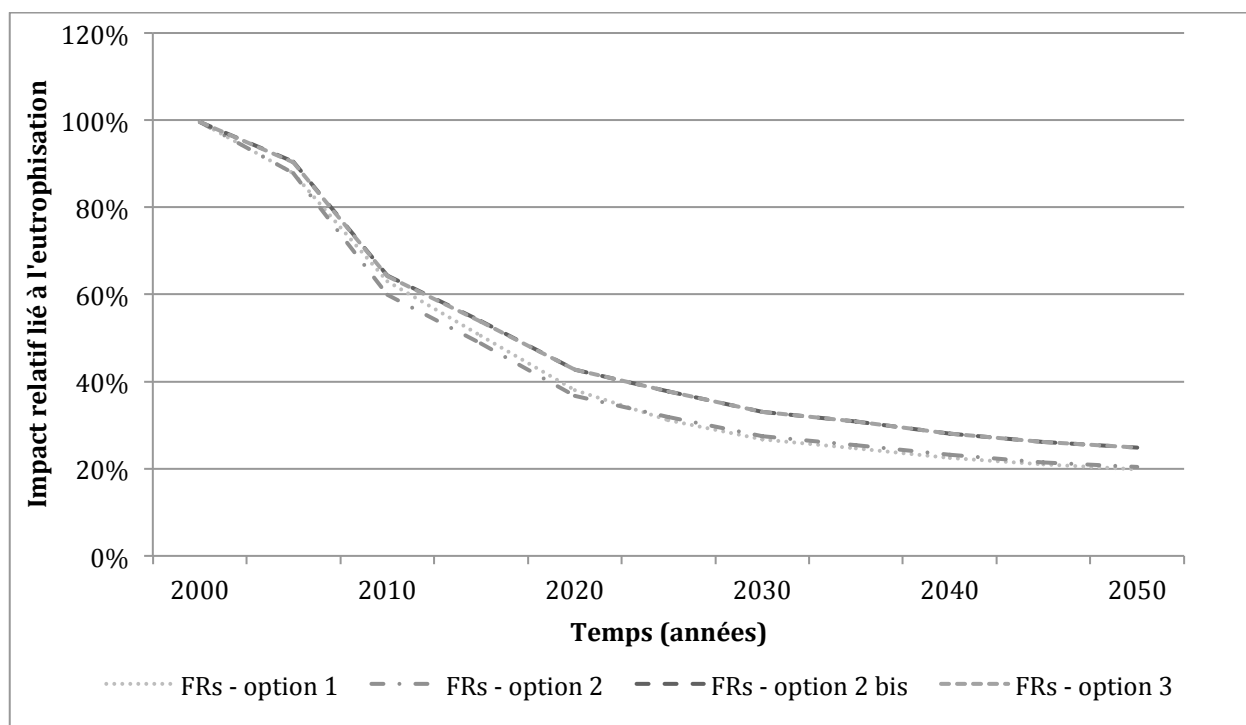


Figure IV-6 : Évolution des impacts relatifs liés à l'eutrophisation pour la filière G  
(scénario de référence)



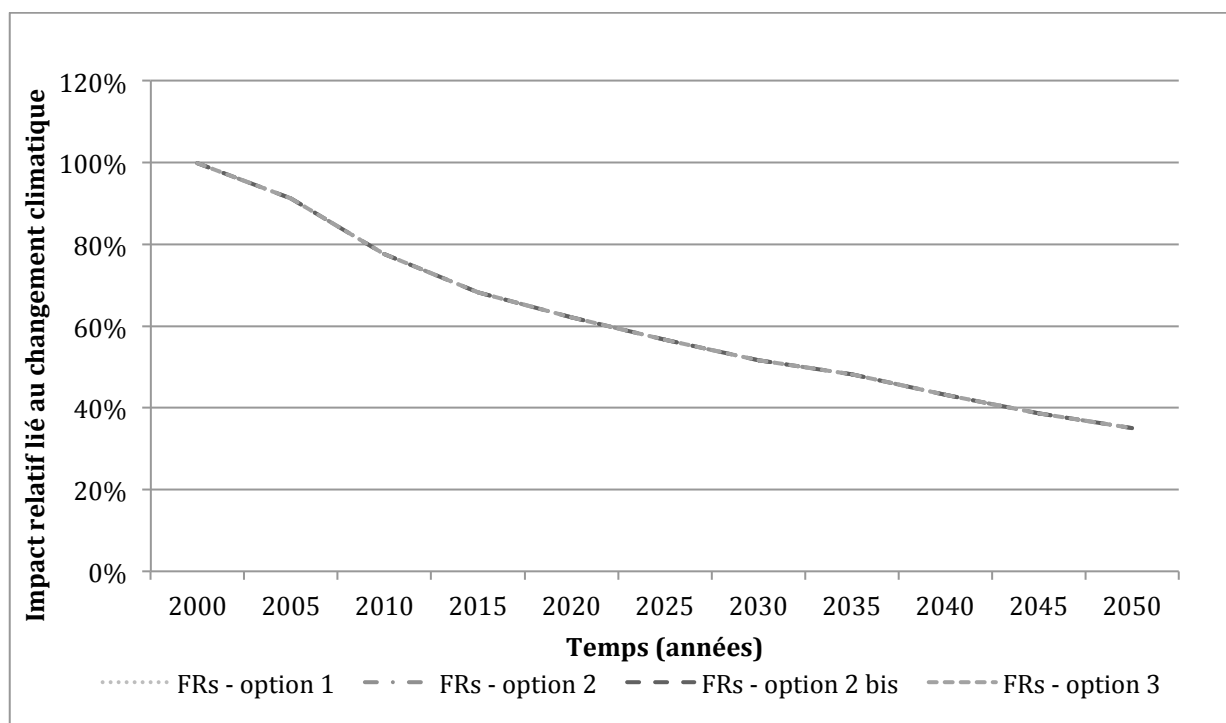


Figure IV-7 : Évolution des impacts relatifs liés au changement climatique pour la filière G (scénario de référence)

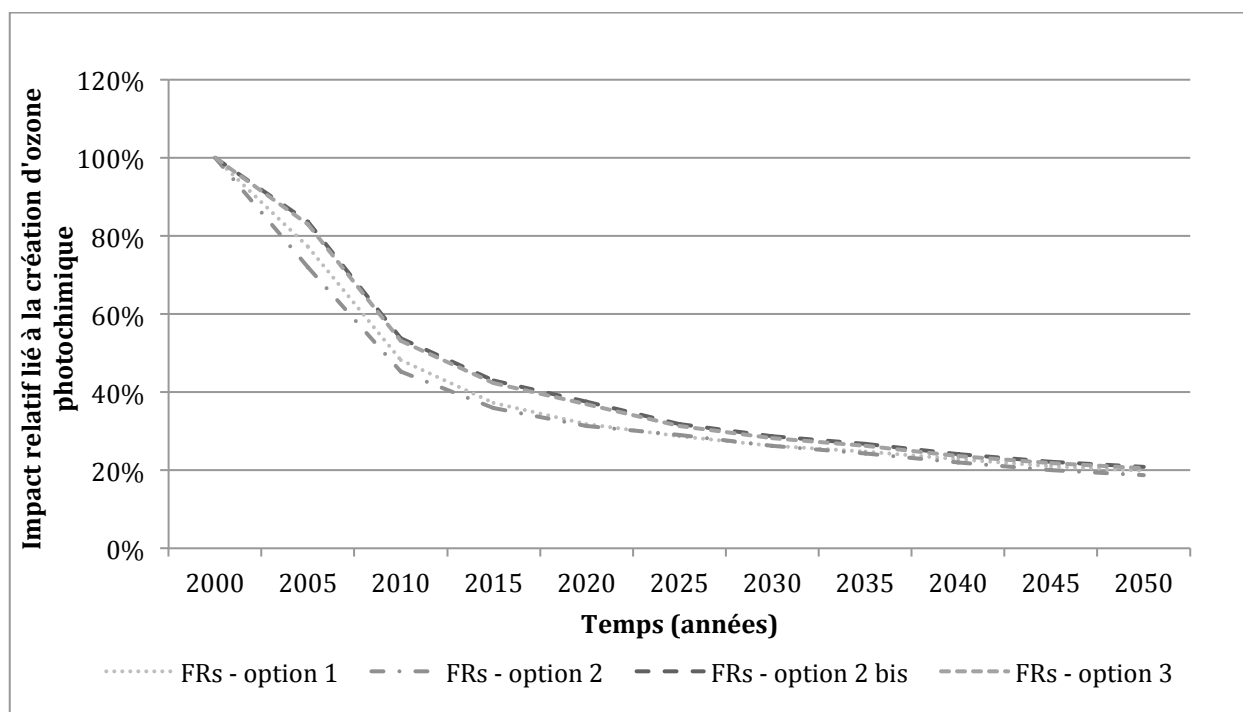


Figure IV-8 : Évolution des impacts relatifs liés à la création d'ozone photochimique pour la filière G (scénario de référence)

Les graphiques suivants présentent les résultats de l'application des facteurs de réduction sur les filières à l'étude pour les deux scénarios. Les quatre catégories d'impacts liées aux émissions sont reproduites. Les résultats sont présentés sous la forme d'impacts relatifs par rapport à ceux de la filière de référence à l'année 2000.

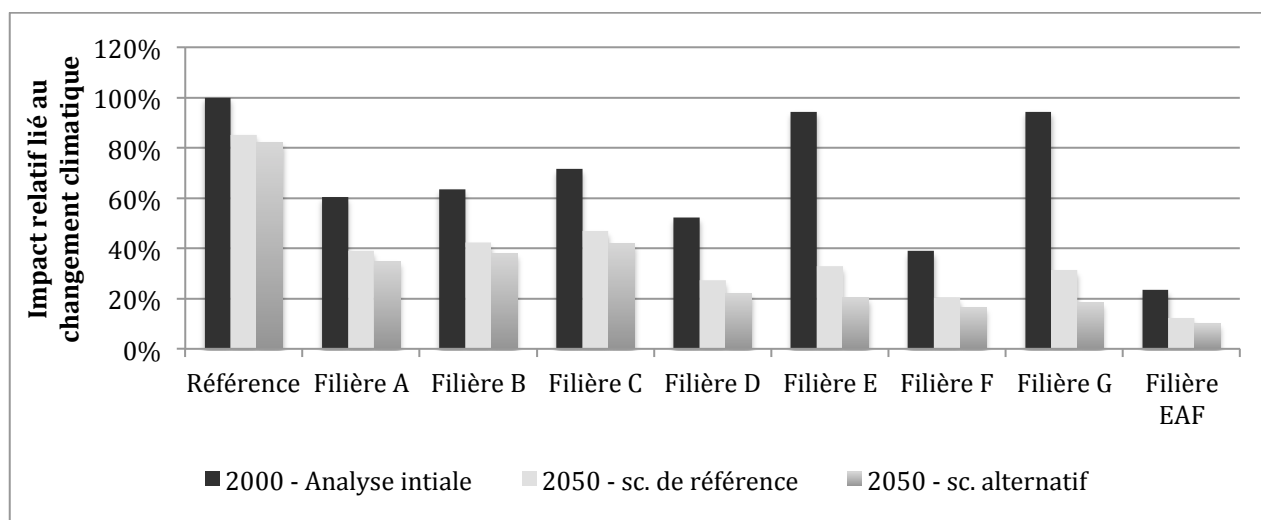


Figure IV-9 : Influence des facteurs de réduction – catégorie changement climatique

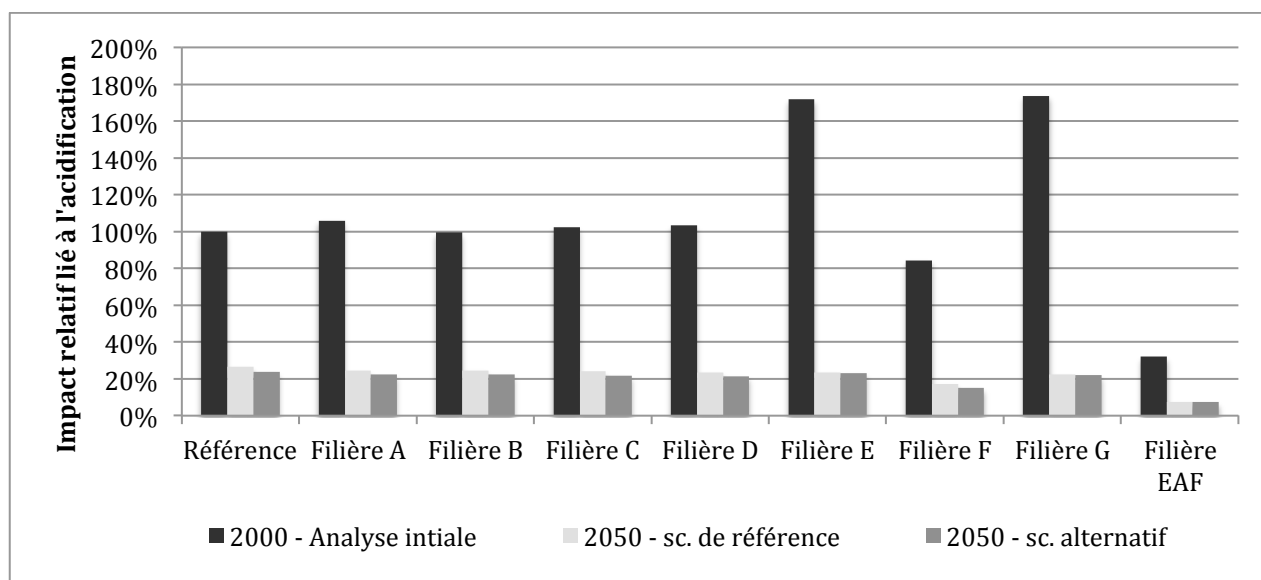


Figure IV-10 : Influence des facteurs de réduction – catégorie acidification

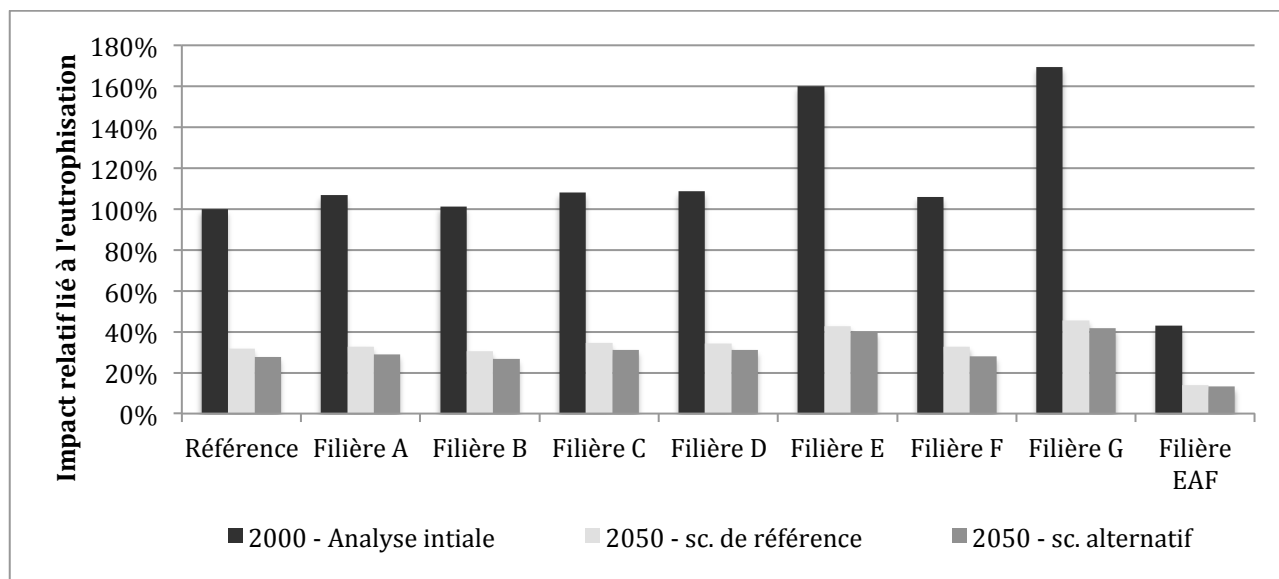


Figure IV-11 : Influence des facteurs de réduction – catégorie eutrophisation

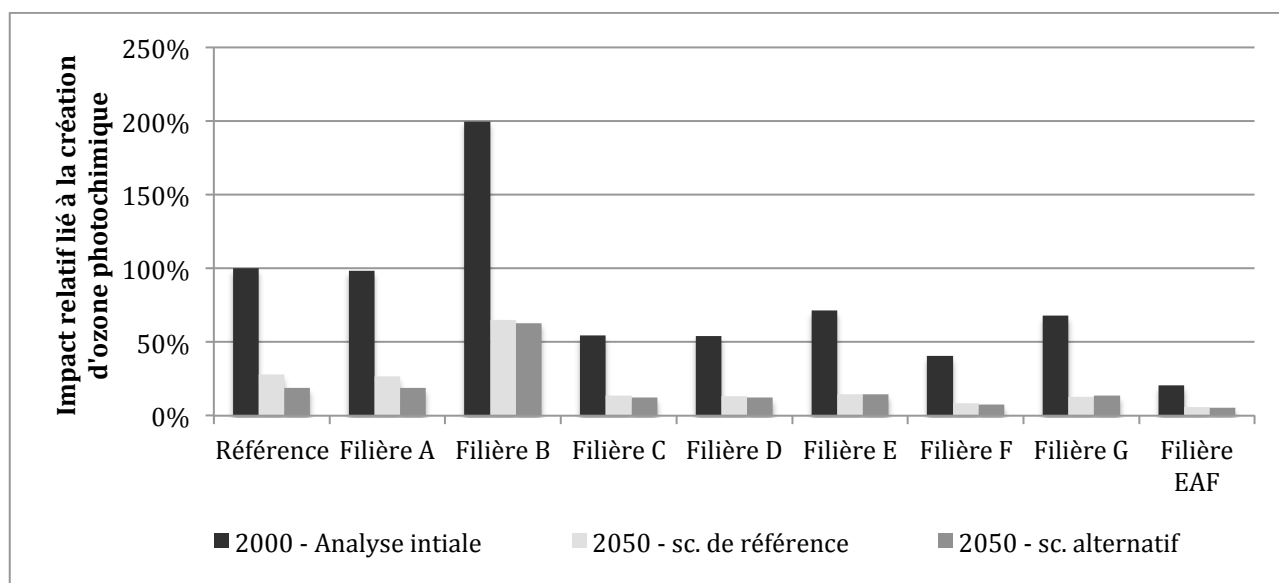


Figure IV-12 : Influence des facteurs de réduction – catégorie création d'ozone photochimique

## ANNEXE V – Évaluation des impacts associés à la production totale d'acier

Les graphiques suivants présentent l'évolution des impacts associés à la production totale d'acier pour les cinq catégories d'impacts étudiées dans ce projet. Les impacts sont présentés en impacts relatifs par rapport à ceux de l'année 2000.

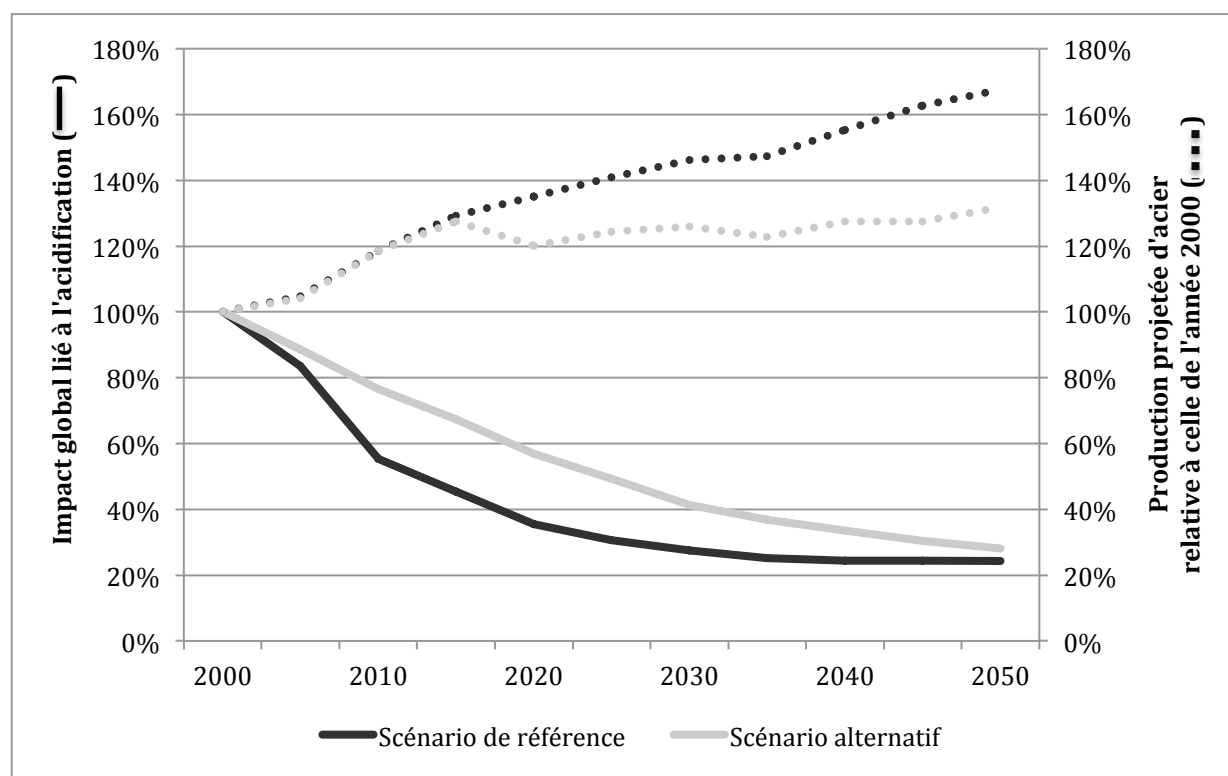


Figure V-1 : Évolution des impacts liés à la production totale d'acier – catégorie acidification

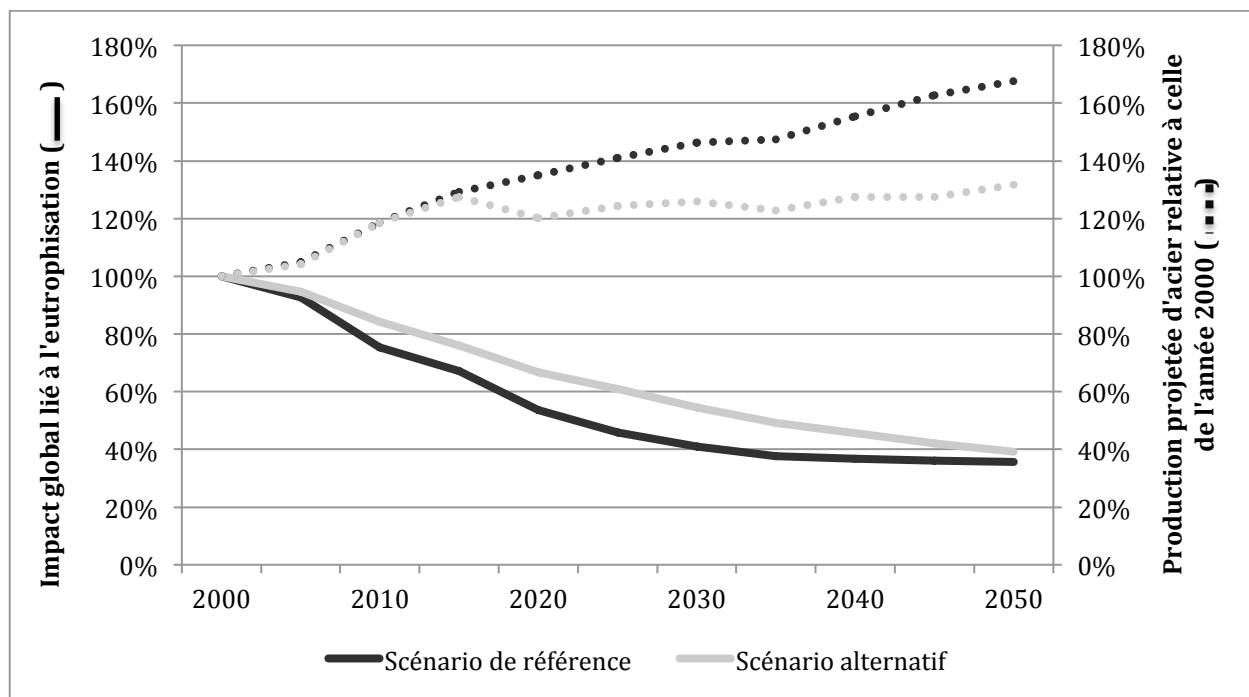


Figure V-2 : Évolution des impacts liés à la production totale d'acier – catégorie eutrophisation

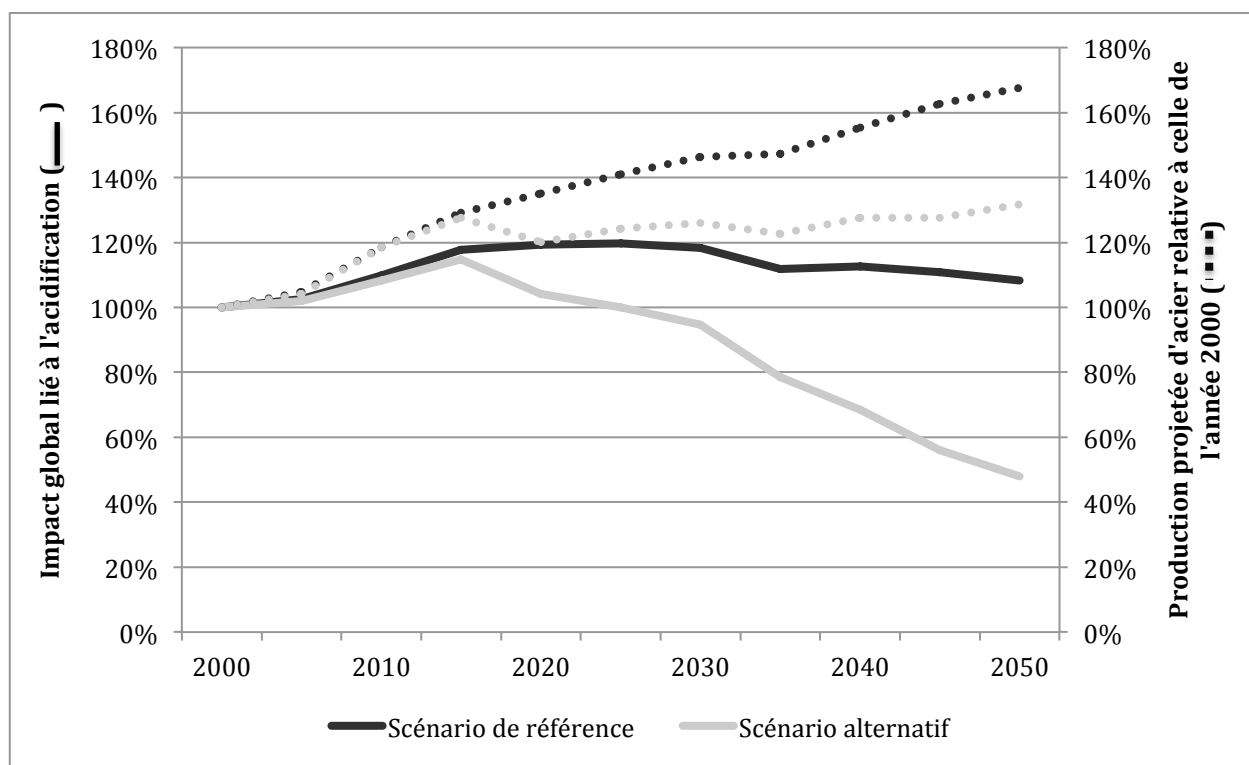


Figure V-3 : Évolution des impacts liés à la production totale d'acier – catégorie changement climatique

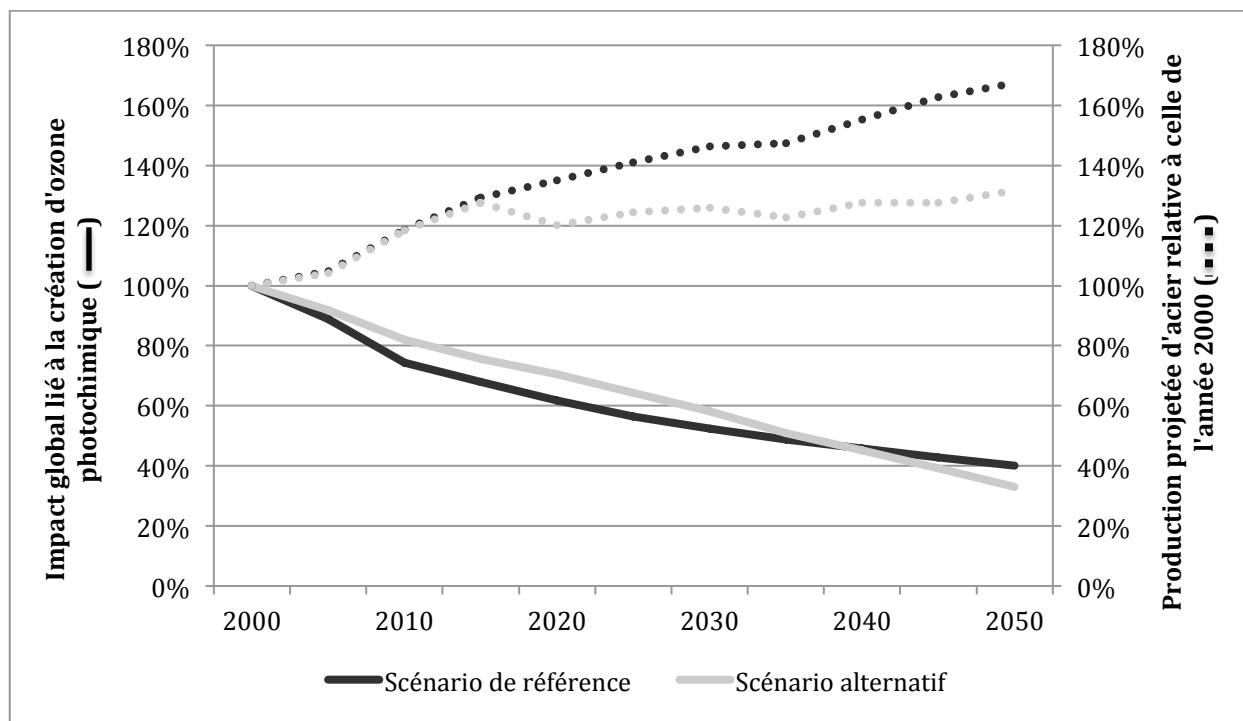


Figure V-4 : Évolution des impacts liés à la production totale d'acier – catégorie création d'ozone photochimique

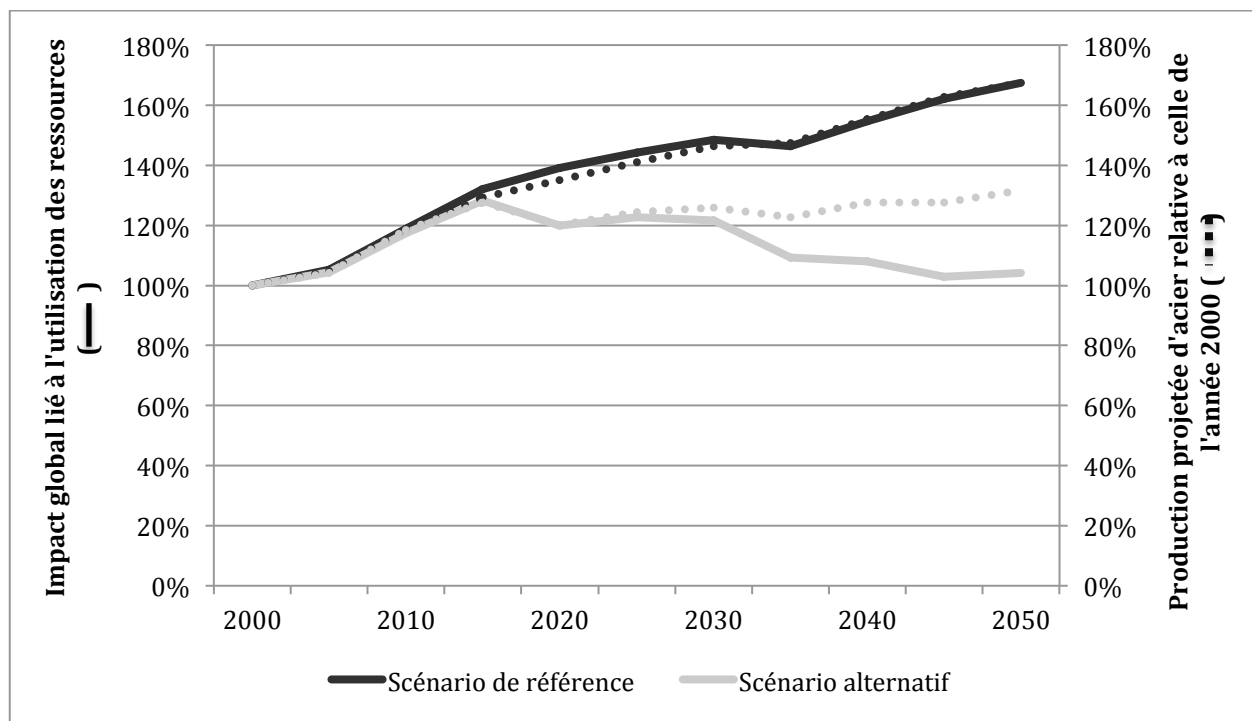


Figure V-5 : Évolution des impacts liés à la production totale d'acier – catégorie utilisation des ressources

Les graphiques suivants présentent l'évolution des impacts associés à la production d'une tonne « moyenne » d'acier pour les cinq catégories d'impacts étudiées dans ce projet. Les impacts sont présentés en impacts relatifs par rapport à ceux de l'année 2000.

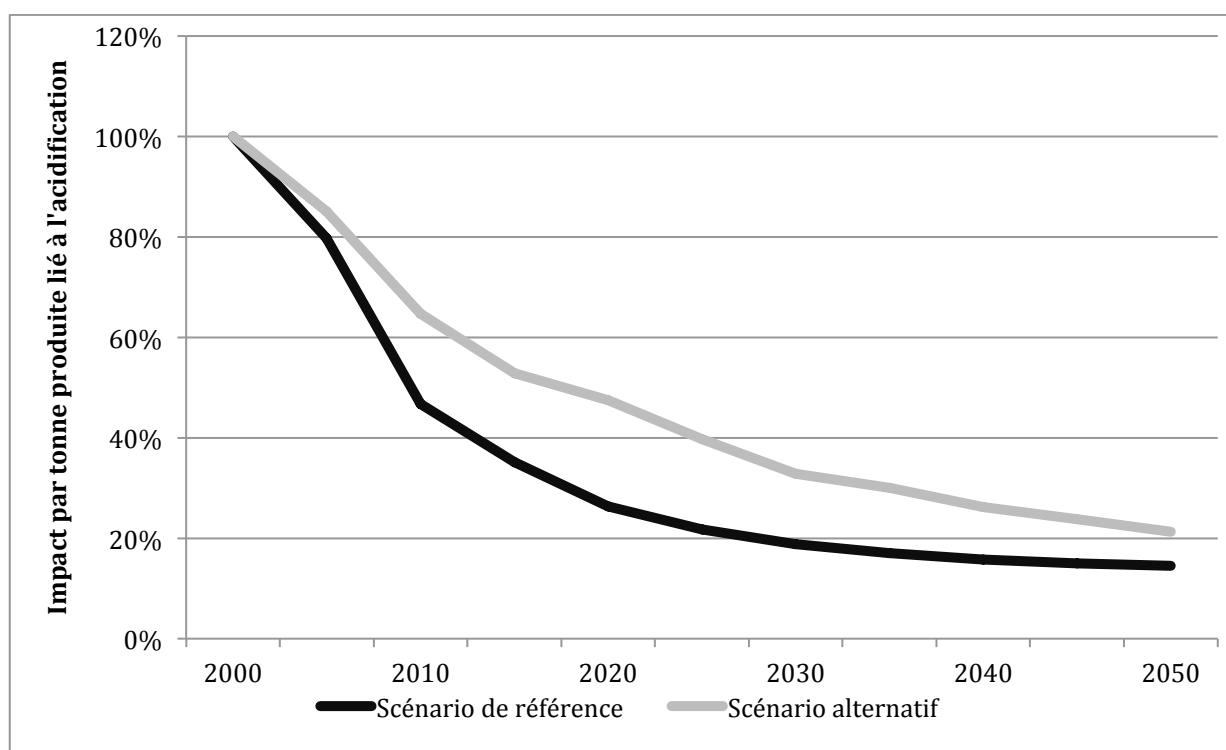


Figure V-6 : Évolution des impacts liés à la production d'une tonne d'acier dans la catégorie acidification

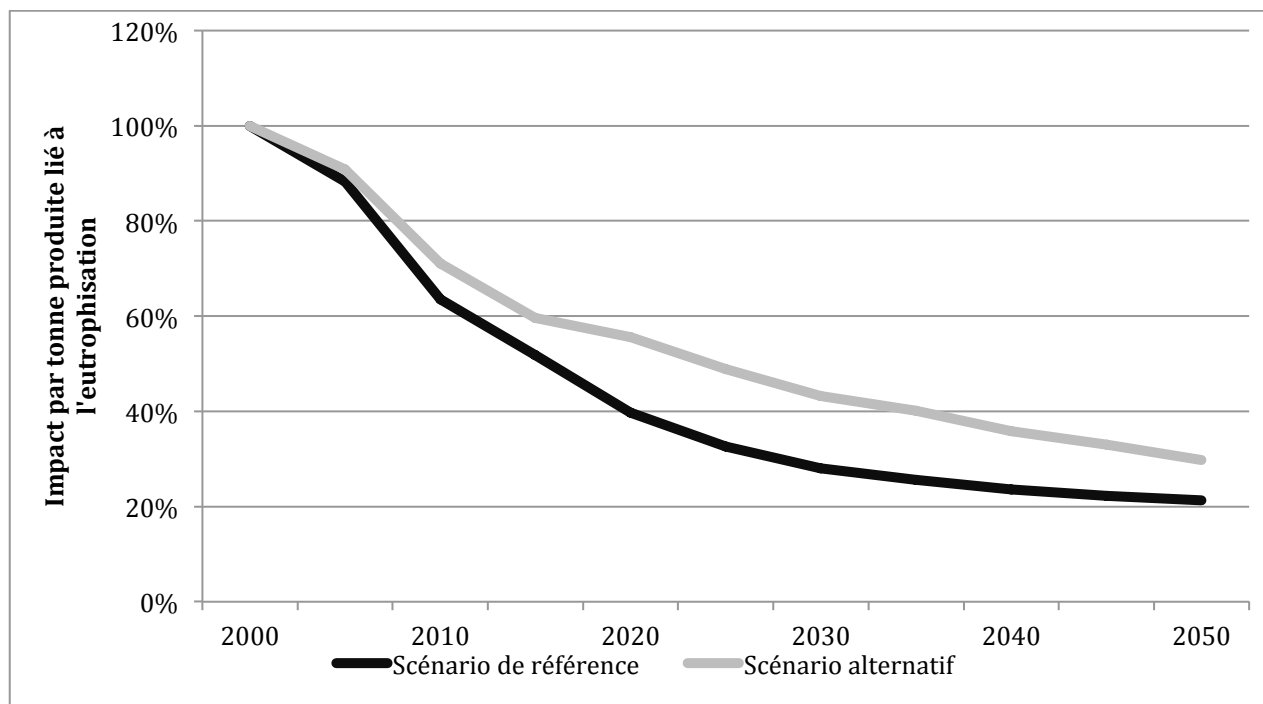


Figure V-7 : Évolution des impacts liés à la production d'une tonne d'acier dans la catégorie eutrophisation

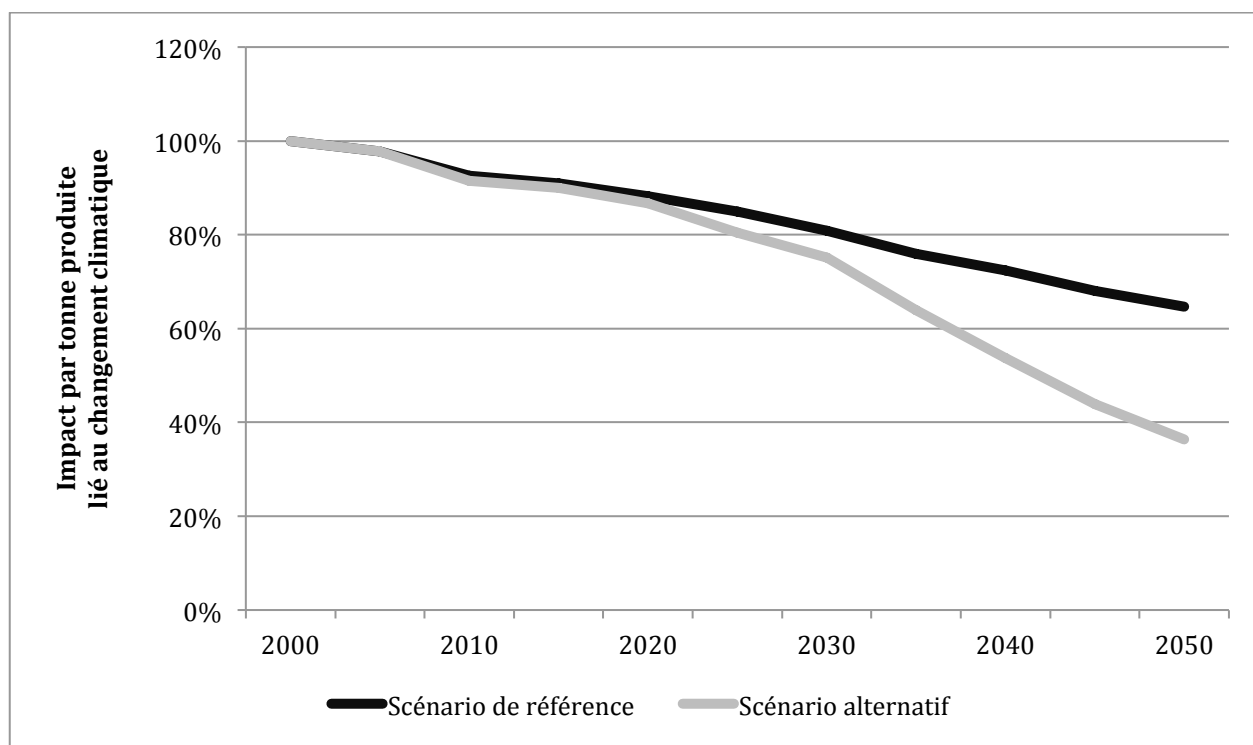


Figure V-8 : Évolution des impacts liés à la production d'une tonne d'acier dans la catégorie changement climatique



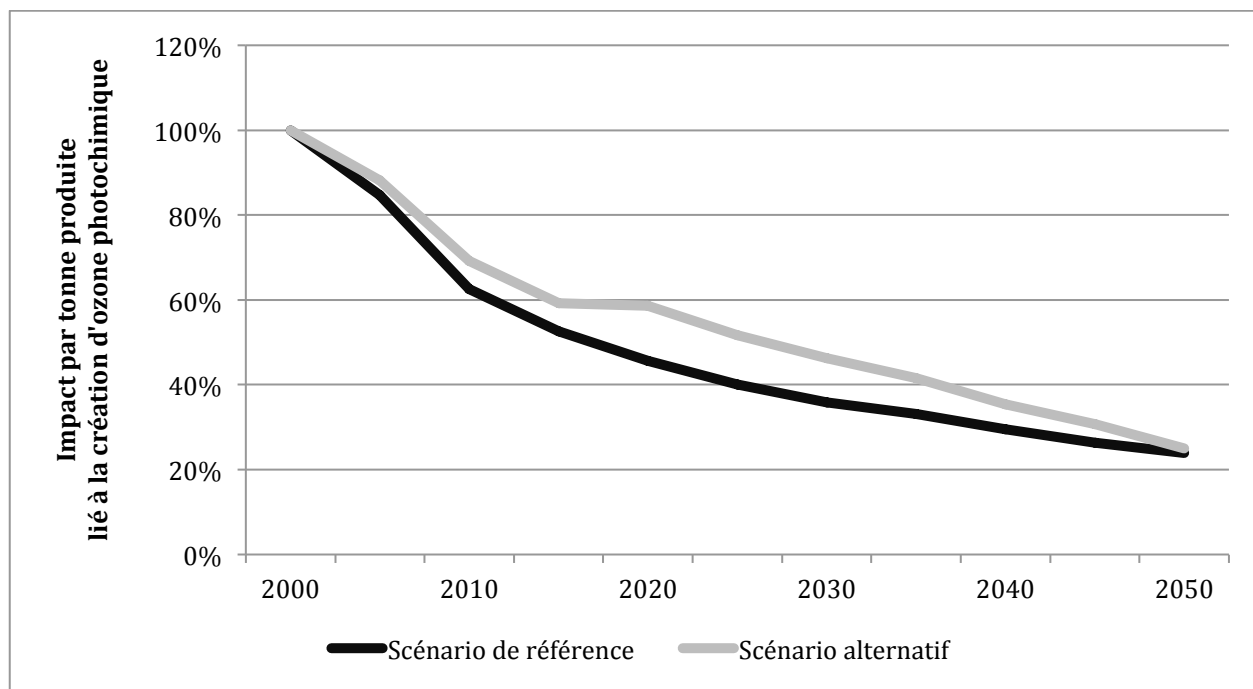


Figure V-9 : Évolution des impacts liés à la production d'une tonne d'acier dans la catégorie création d'ozone photochimique

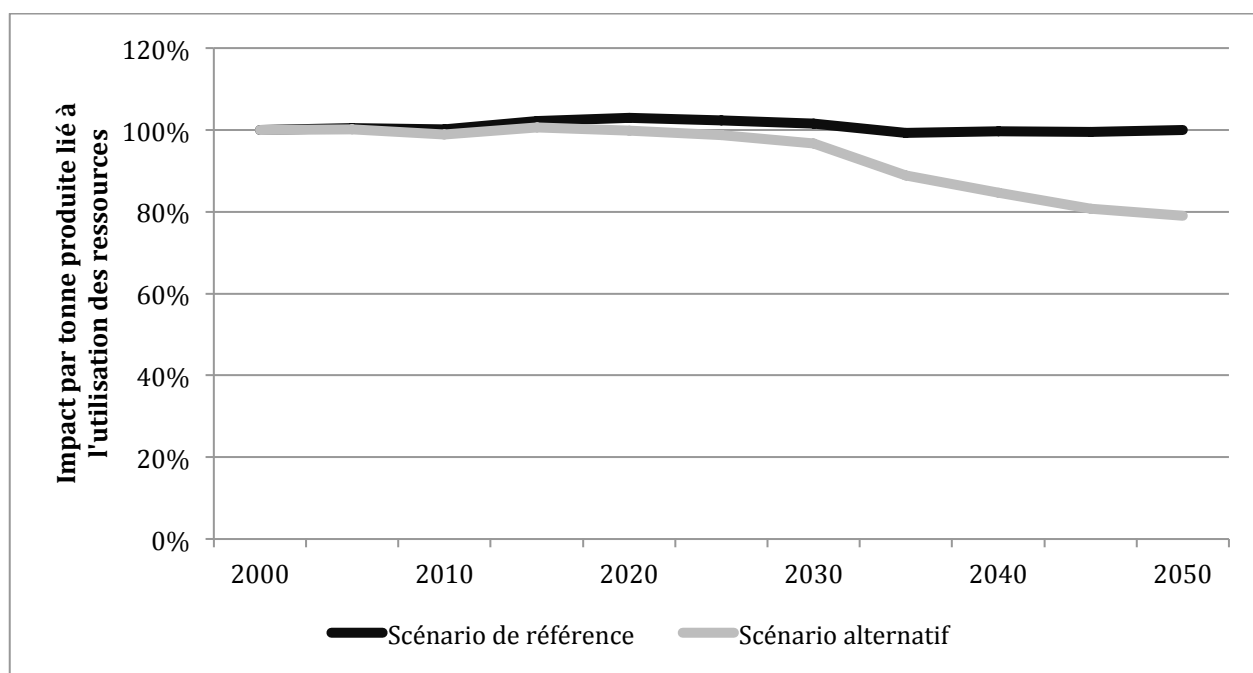


Figure V-10 : Évolution des impacts liés à la production d'une tonne d'acier dans la catégorie utilisation des ressources